

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie – 345

Limity ohybu ocelových trubek za tepla

Hot Bending Limits of Steel Tubes

Student: Stanislav Tylšar

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Ostrava, 2009

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Stanislav Tylšar**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Limity ohybu ocelových trubek za tepla**
Hot Bending Limits of Steel Tubes

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií ohýbání trubek za tepla
2. Sestavení matice proměnných zkružování trubek za tepla
3. Specifikace limitních parametrů zkružování trubek za tepla
4. Analýza technologie zkružování trubek pro materiálové reprezentanty
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem.* Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy.* Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.
ČABELKA, J. a kol. *Mechanická technológia.* Bratislava: VSAV, 1967. s. 594÷599
STANGE, R. *Basic tube bending guide.* Denver: Tool for bending, Inc., 1963. p. 10
SEMIATIN, S. L. a kol. *Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14, Forming and Forging.* Ohio, Metals Park: ASM International, 1998, p. 665÷674

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22.5.2009

.....

Stanislav Tylšar

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevздáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 22.5.2009

.....

Stanislav Tylšar

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

TYLŠAR, S. *Limity ohybu ocelových trubek za tepla*

Ostrava: katedra mechanické technologie – 345 VŠB –TUO,
2009, 53 str.

Diplomová práce, vedoucí: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

Diplomová práce se zabývá současnými výrobními problémy vznikajícími v procesu ohýbání trubek. Problematika ohybu je zaměřena výhradně na ocelové trubky značných geometrických rozměrů za tepla.

V diplomové práci je popsána problematika limitních parametrů a jejich vliv na zrod tvarových deformací na povrchu ohýbaného profilu.

Pro identifikaci vznikajících deformací je vytvořena simulace ohybu pro vybrané materiálové reprezentanty pomocí výpočetního softwaru QForm 3D společnosti Quantor Ltd.

Zjištěním původu nežádoucích tvarových deformací by došlo k jejich monitorování a ke zpřesnění provedení ohýbaného oblouku.

ANNOTATION OF THESIS

TYLŠAR, S. *Hot Bending Limits of Steel Tubes*

Ostrava: Department of Mechanical Technology – 345
Technical University of Ostrava
2009, 53 p.

Thesis, head: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.

The thesis engage in contemporary production problems there are riseing in process bending tubes. Problems of bend are situated on the steel tubes. There is very geometry capacious and high temperature.

In the thesis are descriptive problems limited parameters and their influence on the birth of model deformations on the surface bending profile.

For the identification starting deformations is create malingering of bend for the selection material representatives with help computer software QForm 3D of the company Quantor Ltd.

With find origin undesirable former deformations could be start their monitoring and specify practice of bending bow.

OBSAH DIPLOMÉ PRÁCE

1.	<u>Rozbor technologií ohýbání trubek</u>	10
1.1	Obecné využití trubek	10
1.2	Technologie tváření kovů	11
1.2.1	Rozdělení tvářecích procesů podle teploty	11
1.2.2	Rozdělení tvářecích procesů podle tepelného efektu	14
1.2.3	Rozdělení tvářecích procesů podle stupně deformace	14
1.2.4	Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnějších sil	15
1.3	Obecně charakterizované ohýbání	16
1.3.1	Rozdělení ohýbání z hlediska působení vnějších sil a momentů	17
1.3.2	Popis základních pojmů a značení	19
1.4	Ohýbání trubek za studena a za tepla	21
1.4.1	Ohýbání za studena	21
1.4.2	Ohýbání za tepla	22
2.	<u>Sestavení matice proměnných zkružování trubek za tepla</u>	24
2.1	Vstupní data procesu ohýbání	24
2.1.1	Rozměrové nastavení hlavních funkčních částí stroje	25
2.1.2	Materiály a rozměry polotovarů	29
2.2	Výstupní a verifikační data procesu ohýbání	31
2.2.1	Technologické parametry	31
2.2.2	Výstupní parametry	32
3.	<u>Specifikace limitních parametrů zkružování trubek</u>	34
3.1	Nastavení hlavních limitních parametrů	34
3.1.1	Délka ramena kladky a účelné nastavení kladek	34
3.1.2	Rychlost posuvu trubky a teplota ohřevu materiálu	36
4.	<u>Analýza technologie zkružování trubek za tepla pro materiálové reprezentanty</u>	37
4.1	Řešení pomocí MKP a popis simulačního programu QForm	37
4.2	Volba materiálu a rozměru trubek	38
4.3	Model	40
4.3.1	Deformační napětí	41
4.3.2	Střední napětí	43
4.3.3	Reakce působící v hlavních částech ohýbacího stroje	46
5.	<u>Diskuze dosažených výsledků</u>	50

6.	<u>Závěr</u>	51
7.	<u>Použitá literatura</u>	52

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

α	...	úhel ohybu trubky	[°]
α^*	...	teplotní roztažnost	[K ⁻¹]
Δr	...	průhyb prstence	[mm]
λ_T	...	tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ	...	hustota	[kg.m ⁻³]
ρ^*	...	rezistivita	[Ω. m ⁻¹]
σ_d	...	napětí tlakové	[MPa]
σ_t	...	napětí tahové	[MPa]
σ_p	...	přetvárný odpor v ohybu	[MPa]
a_1	...	vzdálenost induktoru od os vodících kladek	[mm]
a_2	...	osová vzdálenost vodících kladek	[mm]
A_5	...	tažnost	[%]
C, n	...	materiálové konstanty	[-]
D	...	průměr trubky	[mm]
d	...	vnitřní průměr trubky	[mm]
D_p	...	zvětšení rozměru trubky kolmé k rozměru D_r	[mm]
D_r	...	zmenšení rozměru trubky ve směru poloměru ohybu	[mm]
E	...	modul pružnosti	[GPa]
e	...	deformace	[-]
$F_{kl.o.}$...	reakce na ohýbací kladce	[N]
G	...	modul pružnosti ve smyku	[GPa]
I	...	moment setrvačnosti	[mm ⁴]
k	...	materiálový koeficient minimálního poloměru	[-]
L	...	délka ramena ohýbací kladky	[mm]
M_o	...	ohybový moment	[N.m]
n	...	exponent zpevnění	[-]
o	...	ovalita	[%]
R	...	poloměr ohybu měřený na ideální ose trubky	[mm]
R_v	...	poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně	[mm]
R_m	...	poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně	[mm]
R_{min}	...	minimální poloměr ohybu trubky	[mm]

$R_{p0,2}$...	mez kluzu	[MPa]
R_m	...	mez pevnosti	[MPa]
r	...	poloměr středního vlákna prstence	[mm]
r_1	...	poloměr vodících kladek	[mm]
r_2	...	poloměr ohýbací kladky	[mm]
s	...	tloušťka stěny	[mm]
T	...	teplota ohřevu	[°C]
t_v	...	tloušťka stěny na vnější straně trubky	[mm]
t_m	...	tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu	[mm]
W	...	modul průřezu v ohybu	[mm ³]
y	...	posunutí ohybové kl. pro nastavení poloměru oblouku	[mm]

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na problémy související s ohybem ocelových trubek velkých průměrů za tepla. Samozřejmou snahou výrobců je co nejvíce používat ohýbání ocelových trubek za studena. Přistupují k této metodě především z ekonomických důvodů. Čas nutný pro ohýbání za studena je mnohem kratší než čas potřebný pro ohýbání za tepla, do kterého je nutno započítat časy spojené s přípravou a ohřevem materiálu trubky.

Stávající ohýbání ocelových trubek za tepla trpí mnohými problémy, jako jsou ztráta kontur profilu, zeslabování stěny na vnější straně a vrásněním na straně vnitřní.

Limity ohybu těchto ocelových trubek vycházejí jak z tvaru profilu ohýbané trubky a vlastností daného materiálu, tak z teploty ohřevu v místě ohybu a požadavků kladených na přesnost podmínek ohybu.

V bodě 1 se zabývám rozbořem technologií ohýbání trubek. A to jak technologií ohýbání za tepla, tak i za studena.

V bodě 2, „Sestavení matice proměnných zkružování trubek za tepla“, se zabývám vstupními a výstupními daty procesu ohýbání trubek. Mezi tyto důležitá data patří především nastavení hlavních funkčních částí stroje, volené materiály a jejich ohřev, technologické parametry poloměru ohybu a konečná ztráta tvaru profilu.

V bodě 3 specifikuji limitní parametry zkružování trubek, které jsou dány především možnostmi nastavení ohýbacího stroje, rychlost posuvu ohýbané trubky a teplota ohřevu daného materiálu.

Bod 4 zahrnuje analýzu zkružování trubek pro zvolené materiálové reprezentanty. Tato analýza je provedena pomocí výpočetního softwaru QForm 3D a simulace ohýbání ocelové trubky na kladkovém ohýbacím stroji.

Body 5 a 6 obsahují závěrečné zhodnocení dosažených výsledků a závěr diplomové práce.

1. Rozbor technologií ohýbání trubek

1.1 Obecné využití trubek

Ocelové trubky zaujímají v dnešní výrobě velmi důležité místo. Uplatňují se skoro ve všech průmyslových odvětvích. Využívají se především jako konstrukčního materiálu, ale i jako polotovaru pro výrobu různých potrubí.

Ocelových trubek, jako konstrukčního materiálu, se využívá především tam, kde je trubka namáhána krutem. A to proto, že oproti ostatním profilům má při konstantní hmotnosti největší průřezový modul v krutu. I při namáhání ohybem a vzpěrem je trubka velmi výhodným profilem [1].

Ocelové trubky nacházejí největší uplatnění v energetice, v automobilovém a leteckém průmyslu, ale i v chemickém a potravinářském průmyslu. Své místo našli i v elektrotechnice a ve stavebnictví.

Taková to pestrost použití trubek v různých odvětvích průmyslu vyžaduje i velký sortiment vyráběných trubek. Především pokud jde o rozměry a požadovanou jakost materiálu.

Trubky jsou v provozu vystaveny mechanickému namáhání vnějšími silami, a to tahem, tlakem, ohybem, smykem, kroucením a jejich kombinacemi, dále namáhání vnějším a vnitřním přetlakem. Přitom mohou být vystaveny tepelnému namáhání, způsobenému rozdílným tepelným stavem v jejich objemu a v různém údobí jejich používání. K těmto všem účinkům pak přistupují i vlivy chemické. V praxi většinou jde o kombinaci těchto vlivů [1].

Na trubky a potrubí jsou přibližně kladeny tyto požadavky:

- Pevnost a stálost tvaru v rozmezí pružných deformací při působení vnějších sil a momentů za normální teploty,
- pevnost a stálost tvaru při působení vnějších sil a momentů za současného působení vysokých nebo nízkých teplot,
- pevnost a stálost tvaru za shora uvedených podmínek za současného působení a chemických vlivů,
- odolnost proti otěru,
- odolnost proti korozivním a jiným chemickým vlivům,
- velká tepelná vodivost nebo naopak požadavek izolačních vlastností,

- elektrická vodivost nebo nevodivost,
- Různé technologické požadavky – pružnost, velká tvárnost, obrobiteľnosť [1].

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu trubek je ocel. Tento materiál je použit i pro výrobu trubek, u kterých zkoumám limitní stavy ohybu v diplomové práci.

Při ohýbání trubek z jiných materiálů lze využít většiny poznatků z ohýbání ocelových trubek [1].

1.2 Technologie tváření kovů

Výrobní technologie tváření kovů patří mezi hlavní způsoby výroby strojírenských součástí a polotovarů [2].

Procesem plastické deformace prochází většina světové výroby kovových součástí. Hlavním požadavkem procesu tváření je získání požadovaného tvaru součásti, ale také dosažení požadované mikrostruktury materiálu. Technologický proces by měl být stabilní. A to proto, aby mohl být opakován.

Podstatou tváření je tedy vznik plastických deformací, ke kterým dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál. Tento děj je provázen fyzikálními změnami a již zmíněnými změnami struktury materiálu, což ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu.

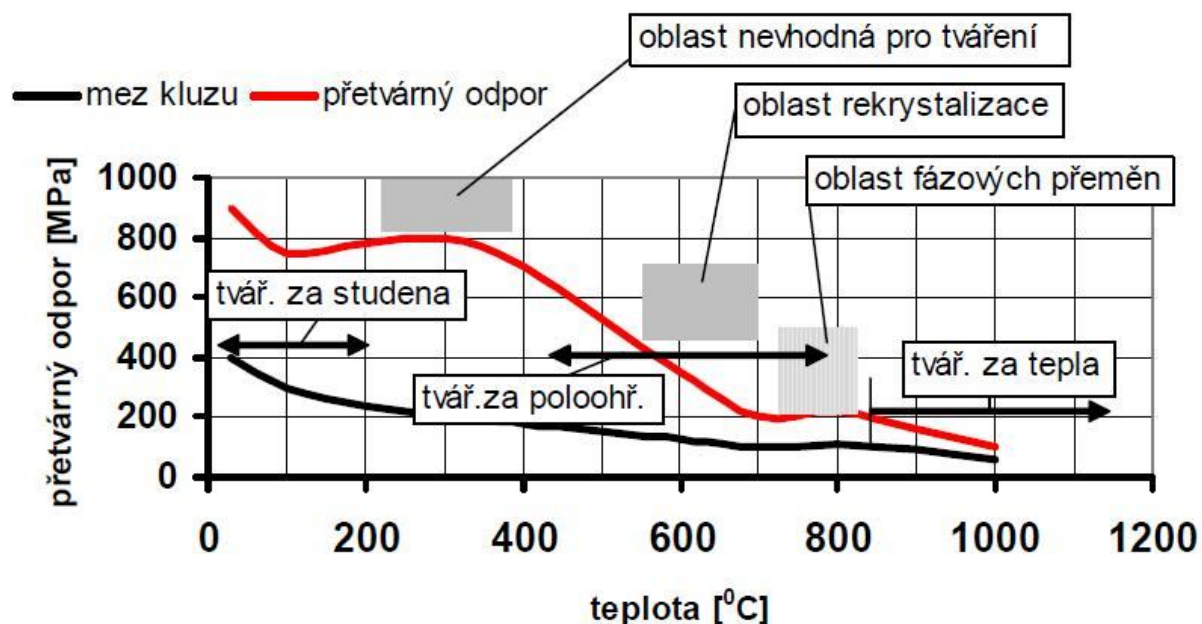
Výhodami tváření jsou vysoká produktivita práce, vysoké využití materiálu a velmi dobrá rozměrová přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je pak vysoká cena strojů a nástrojů a omezení rozměry konečného výrobku [3].

Technologické tvářecí procesy je možné rozdělit podle:

- Teploty,
- tepelného efektu,
- stupně dosažené deformace,
- podle působení vnějších sil [3].

1.2.1 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty

Při tvářecích procesech, u kterých dochází ke změně teploty se mění deformační odpor materiálu (oceli). S rostoucí teplotou tvářecího procesu se zlepšují i plastické vlastnosti kovů a jejich slitin.



Obr.1 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [5]

Rozdělení tvářecích procesů podle teploty je vlastně rozdělení podle vztahu teploty tvářeného materiálu k teplotě rekrytalizace. Při rekrytalizační teplotě dochází k regeneraci deformovaných zrn vzniklých tvářením bez změny krystalové mřížky (za studena). Tvářecí technologie rozdělujeme podle teploty tedy na tvářením za studena a tvářením za tepla, které je i předmětem zájmu mé diplomové práce.

a) Tváření za studena

Tváření za studena je tvářením pod rekrytalizační teplotu. Teplota se pohybuje pod hodnotou 30% teploty tání tvářeného materiálu. Při tomto procesu dochází ke zpevňování materiálu, k jeho zachování a k nárůstu odporu proti dalšímu tváření, až nakonec dojde k vyčerpání plastických vlastností materiálu. Zrna se začínají deformovat ve směru tvářením (vznik textury) a dojde k anizotropii mechanických vlastností. Zpevněním se zvýší mechanické hodnoty, jako mez pevnosti a kluzu, ale poklesne tažnost tvářeného materiálu.

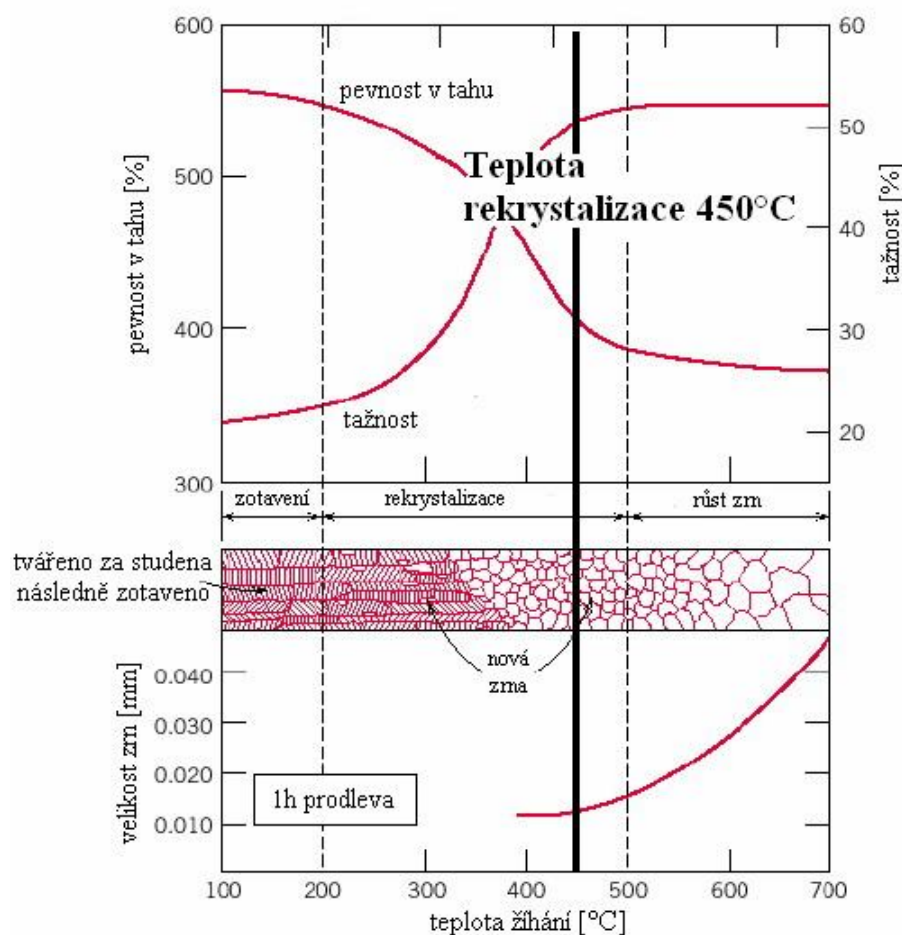
Zahřátím kovu je možné obnovit deformační schopnost. Materiál získá předešlé vlastnosti být plasticky tvářen.

Výhodou je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch (bez okují) a zlepšování vlastností zpevněním. Nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu [3].

b) Tváření za tepla

Tváření za tepla je nejčastěji definováno jako tváření nad rekrystalizační teplotou. Teplota se pohybuje nad hodnotou 70% teploty tání daného materiálu [3]. Tváření za tepla je tváření za takové teploty a rychlosti deformace, kdy je vlivem uzdravovacích procesů, probíhajících současně s deformací přetvárný odpor udržován na nízké hodnotě.

O tom, který mechanismus se u jednotlivého tvářeného materiálu uplatní, rozhodují zejména typ krystalické mřížky a hodnota energie vrstevné chyby [2].



Obr.2 Vliv teploty na rekrystalizace [3]

Výhodami tváření za tepla jsou nízké přetvárné odpory a výrazně nižší silové namáhání nástrojů, které se pozitivně odráží na vynaložených nákladech na zařízení a spotřebě energie.

Nevýhodami tváření za tepla však mohou být oxidace materiálu (oduhličení), kvalita povrchu, životnost nástroje, mazání, absence zpevňování a nižší úroveň homogenizace vlastností a struktury než při tváření za studena.

Tváření za tepla může probíhat v širokém rozsahu teplot a rychlostí deformací. Od tzv. zvýšených teplot $(0,4 - 0,5)T_{TAVENÍ}$ při super plastickém a isothermickém tváření, po vysoké $(0,6 - 0,8)T_{TAVENÍ}$. Od rychlostí deformací $(10^{-5} - 10^{-4})$ při superplastickém tváření po rychlosti řádu $(10^2 - 10^3)$ při tváření „za horka“ [2].

c) **Tváření za poloohřevu**

Tento druh tváření představuje jakýsi kompromis mezi tvářením za studena a za tepla. Důvodem je zlepšení přetvárných vlastností oproti tváření za studena, snížení přetvárných odporů, dosažení zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností, přesnosti a jakosti povrchu. Horní teploty jsou omezeny oxidací povrchu [3].

1.2.2 Rozdělení tvářecích procesů podle tepelného efektu

Část energie, vynaložené na tváření, se mění na teplo. Množství tohoto tepla závisí na rychlosti deformace a odporu proti deformaci.

Podle toho, kam se odvede vzniklé teplo, se tvářecí procesy dělí na [3]:

- Izothermické tváření – teplo je odvedeno do okolí, teplota tvářeného kovu se nemění, deformace je pomalá,
- adiabatické tváření – teplo zůstává v materiálu, dochází k navýšení teploty kovu, deformace je extrémně rychlá,
- polytropické tváření – část tepla je odvedena do okolí a část zůstává v materiálu, nejčastější případy tváření.

1.2.3 Rozdělení tvářecích procesů podle stupně deformace

Kritériem u tohoto rozdělení je stupeň deformace při určité teplotě a rychlosti deformace. A to celé bez nebezpečí vzniku trhlin na povrchu materiálu.

Část energie se při tváření mění na teplo. Množství tohoto tepla závisí na rychlosti deformace a odporu materiálu proti samotné deformaci.

Podle toho se tvářecí procesy dělí na [3]:

- Procesy, kdy tlak mezi nástrojem a materiálem je malý, ke vzniku deformace stačí malé síly (volné kování),
- procesy, kdy tlak mezi nástrojem a materiálem je velký, ke vzniku deformace jsou potřebné velké síly (zápustkové kování),
- procesy, kdy tlak mezi nástrojem a materiálem je velmi vysoký, ke vzniku deformace jsou potřeba značně velké síly (protlačování).

1.2.4 Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnějších sil

- Tváření objemové, při kterém deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému, patří sem válcování, kování, tažení drátů,
- tváření plošné, při kterém převládají deformace ve dvou směrech, patří sem tažení, ohýbání, stříhání atd. [3].

1.3 Obecně charakterizované ohýbání

Ohýbání je proces plošného tváření, vyvolaný působením momentů vnějších sil. V místě ohybu se průřezy kolmé k rovině momentu k sobě natáčí kolem osy ležící mimo tvárný materiál. Ohnuté (prostorové) tvary lze rozvinout.

Při ohýbání tvoří plastická deformační zóna zpravidla jen velmi malou část objemu polotovaru [4]. Z tohoto důvodu zůstává poměr plochy povrchu polotovaru k objemu polotovaru, během procesu prakticky konstantní. Významnou částí celkových deformací tvoří pružné deformace použitého materiálu, proto nemohou být zanedbávány.

Při praktickém použití ohýbaných trubek, v již zmiňovaných průmyslových odvětvích, se vyskytují nejrozličnější požadavky na tvar ohybů. Z hlediska geometrického jsou to:

- Ohyb ležící v jedné rovině – využití ve volných prostorech (venkovní potrubí),
- ohyb v několika rovinách – využití v omezeném prostoru,
- ohyby prostorové – využití pro technologické účely (topný had ve tvaru spirály) [1].

K tomu abychom dosáhli požadovaného geometrického tvaru trubky, můžeme použít několika různých způsobů ohýbání. Při volbě vhodného způsobu ohybu závisí především na materiálu trubky, jejím rozměru a požadavku minimálního poloměru ohybu.

Činitelé omezující použití určitého způsobu ohýbání jsou především [1]:

- Tažnost materiálu, která je různá za studena a za tepla,
- dosažení správného geometrického tvaru bez zvlnění na vnitřní straně ohybu.

Nejnáročnější jsou ohyby, při kterých se požaduje dosažení hladkého ohybu při malém poloměru [1]. Při takovém to náročném ohybu je možno použít nejrozličnějších kombinací působení momentů a příčných sil, ale i za současného působení osových a tangenciálních sil. A to jak v tahu, tlaku a kroucení, podle toho, jakého geometrického tvaru potřebujeme dosáhnout.

Hlavním požadavkem při ohýbání trubek je dosažení rovnoměrného ohybu v procesu celého ohybu. Takový to požadavek lze splnit jen tehdy, když na trubku bude v celé její délce působit stejný ohybový moment nebo pokud ohýbání bude probíhat postupně. Tzn., že síly a momenty budou při ohýbání měnit svá působišť [1].

1.3.1 Rozdělení ohýbání z hlediska působení vnějších sil a momentů

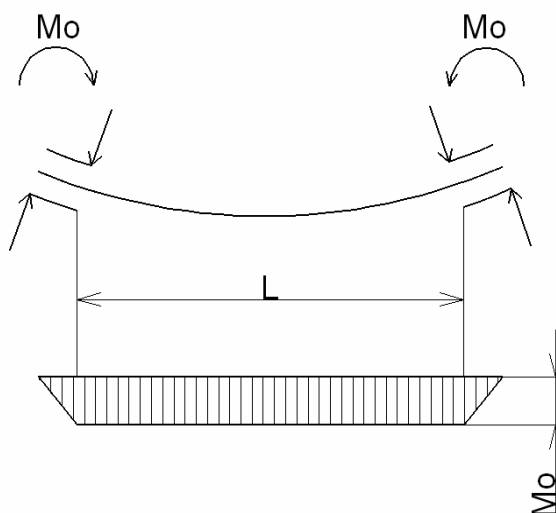
U tohoto bodu je nejvýhodnější rozdělení způsobů ohýbání podle momentů a sil působících na trubku při ohybu bez zřetele na to, zda se ohýbá za studena nebo za tepla [1].

a) Ohýbání pouhým ohybovým momentem

Ohýbání pouhým momentem ohybu znamená bez působení příčných sil kolmých k ose ohýbané trubky. Průběh ohybového momentu je konstantní v celé délce ohybu trubky. Tím je zajištěno rovnoměrné ohýbání v celé délce trubky na stejný poloměr ohybu. Toto kritérium ovšem platí pouze pro pružný ohyb.

Složitější je průběh ohybu po překročení meze kluzu, kdy se nepříznivě projeví různé nestejnorodosti materiálu i různé odchylky tvaru příčného řezu trubkou [1].

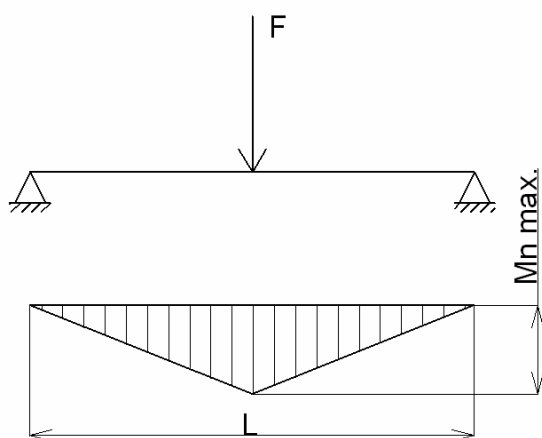
Při tomto způsobu ohýbání dochází k poměrně k vysokému stupni tváření, které má při překročení meze kluzu na vnějších pásmech materiálu za následek borcení ohybu a zploštění průřezu. Proto se hodí pro ohýbání trubek velkých průměrů při malém zakřivení.



Obr.3 Ohýbání pouhým momentem

b) Ohýbání momentem vyvolaným příčnými silami

V tomto případě je ohyb vyvolán příčnými silami působícími na ohýbanou trubku. Velikost ohybového momentu po celé délce trubky není stejná. Klesá z maxima pod zatěžující silou na nulu [1].

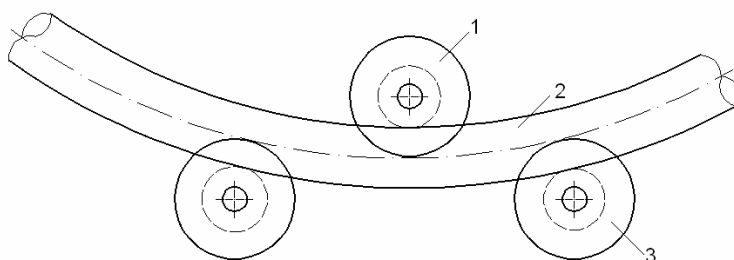


Obr.4 Ohýbání příčnou silou

c) Ohýbání zakružováním

Ohýbání zakružováním se provádí mezi třemi nebo více kladkami.

Ohybový moment je opět vyvozen silami kolmými k ose trubky, které vzhledem k trubce mění svá působišť. Trubka je při ohýbání buď ohýbacími kotouči vtahována nebo je mezi kotouče vtlačována. Podle toho pak vznikají různé přídavné síly. Kromě ohýbacího momentu může působit na ohýbanou trubku i moment krutící, takže je možno zakružovat i do tvaru šroubovice [1].



Obr.5 Zakružování trubek

1 – vnitřní kladka, 2 – trubka, 3 – vnější kladka

d) Ohýbání navíjením na tvarový segment

Při této metodě probíhá ohyb trubky postupně, kdy příčné síly kolmé k ose trubky mění svá působišť. Navíc působí ještě osové síly vyvozené třením trnu a přitlačné lišty.

Tato metoda ohýbání trubek se nejvíce využívá při ohýbání za studena u ohybů do 180° .

e) Ohýbání vytlačováním ohýbané trubky

Ohýbaná trubka je vedena vodítkem a otáčí se kolem pevného čepu [1]. I při této metodě je ohybový moment vyvozen příčnými silami kolmými k ose trubky. Současně působí osová síla vznikající při vytlačování trubky (tlak). Trubka je nejčastěji vytlačována hydraulickým pístem. Pro vyztužení trubky proti zploštění a borcení se používá článkového trnu [1].

1.3.2 Popis základních pojmů a značení

Jak již bylo řečeno stávající ohýbání ocelových trubek trpí mnohými problémy jako jsou ztráta ovality profilu, zeslabování stěny na vnější straně a vrásnění na straně vnitřní.

Kruhový příčný řez trubkou se při ohýbání mění a může nabývat různých tvarů. Nejčastěji je to tvar, kde se rozměr trubky ve směru poloměru ohybu zmenší na hodnotu D_r a rozměr ve směru k němu kolmém v příčném řezu se zvětší na D_p [1]. Za takovýchto podmínek vznikne z kruhového řezu trubky zploštělý nekruhový tvar, pro který bude platit, že $D_r / D_p < 1$.

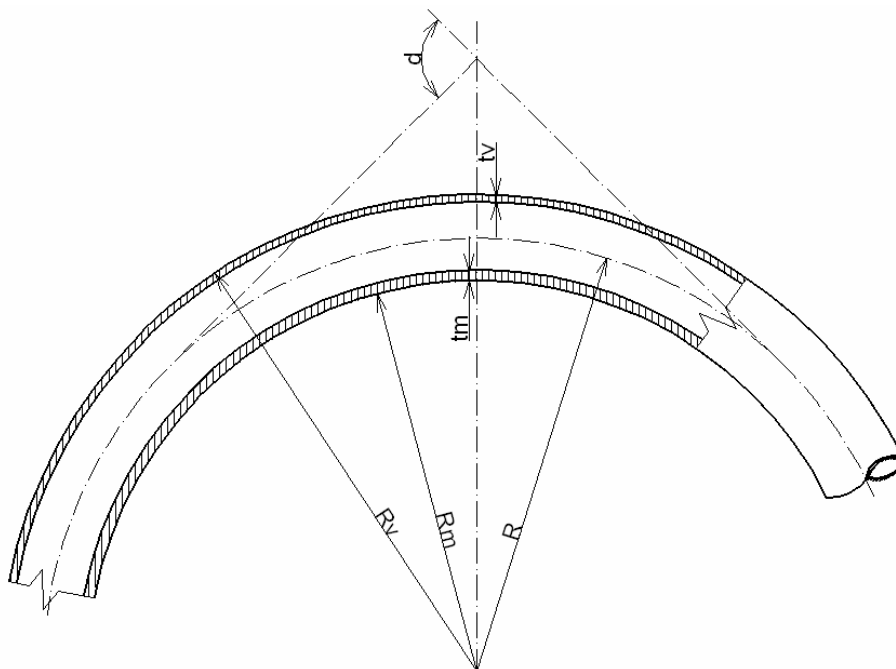
V některých případech však může nastat, že $D_r / D_p > 1$. Potom se tento tvar nazývá vydutý.

Pro vyjádření ovality příčného řezu trubky je možno zavést hodnotu poměrné ovality, která se vypočte ze vzorce [1]:

$$\text{Poměrná ovalita trubky: } o = \frac{D_p - D_r}{D} \quad (1)$$

D_r	...	hodnota zmenšení rozměru trubky ve směru poloměru ohybu	[mm]
D_p	...	hodnota zvětšení rozměru trubky kolmé k rozměru D_r	[mm]
D	...	průměr trubky	[mm]

Na obrázku 6 je znázorněn řez ohnutou trubicí po zhotovení ohybu a zakótovány požadované základní rozměry ohnuté trubky.



Obr.6 Řez ohnutou trubicí

R	...	poloměr ohybu, měřený na ideální ose trubky	[mm]
R_v	...	poloměr ohybu krajních vláken na vnější straně ohybu	[mm]
R_m	...	poloměr ohybu krajních vláken na vnitřní straně ohybu	[mm]
t_v	...	tloušťka stěny na vnější straně ohybu	[mm]
t_m	...	tloušťka stěny na vnitřní straně ohybu	[mm]
α	...	úhel ohybu trubky	[°]

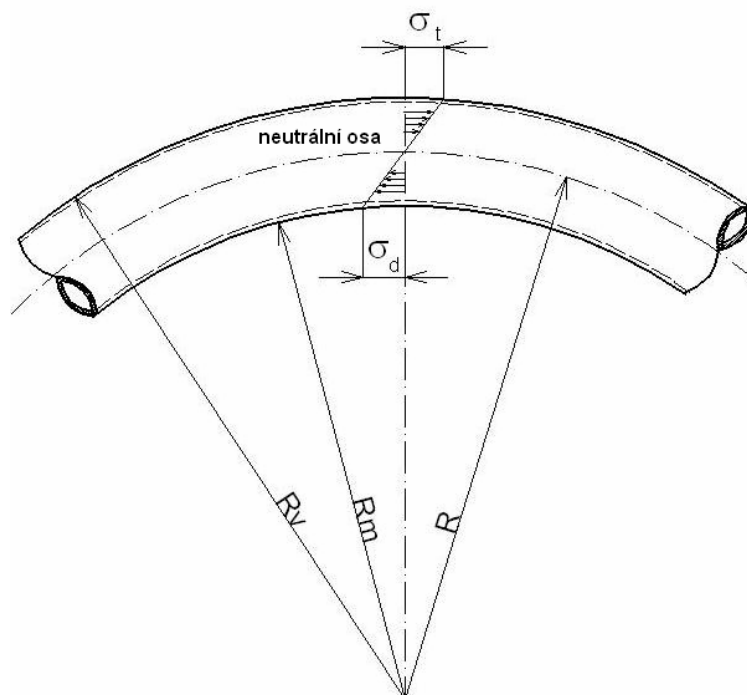
Poloměr ohybu trubky R se velmi často vyjadřuje násobkem vnějšího průměru trubky, například $R = 3D$.

V diplomové práci se zabírám poloměrem ohybu v rozmezí $R = 4D \div 10D$.

1.4 Ohýbání trubek za studena a za tepla

Při namáhání ocelové trubky ohybovým momentem dochází k pružnému ohybu, při kterém je rozložení napětí v příčném řezu lineární. Krajiní vlákna na vnější straně ohybu R_v jsou namáhána největším tahovým napětím a krajiní vlákna na vnitřní straně ohybu R_m jsou namáhána největším tlakovým napětím.

Směrem k neutrální ose obě tyto napětí klesají, až na neutrální ose se rovnají nule. Neutrální osa při pružném ohybu nezmění svoji délku a souhlasí s osou trubky. Při dalším ohýbání překročí napětí v krajních vláknech mez kluzu a prodloužení dále roste. Podobně na tlačné straně dojde k trvalému stlačování. Průběh napětí při trvalých deformacích již není lineární [1].



Obr. 7 Rozložení napětí při pružné deformaci v ohýbané trubce

1.4.1 Ohýbání za studena

Při tváření za studena se materiál zpevňuje a dochází k překročení meze kluzu v jednotlivých vláknech trubky. Ohýbaná trubka se tedy na vnějším poloměru prodlužuje (tloušťka stěny klesá) a na vnitřním dochází k pěchování materiálu (tloušťka stěny roste).

V neutrální ose roste tahové napětí a poloha této osy se postupně přesouvá směrem ke středu ohybu.

Na polohu neutrální osy má vliv daný způsob ohýbání trubky, především působení ohybového momentu společně tahem a tlakem.

Materiál tvářený za studena se po odlehčení vrací podobně jako při pružných deformacích. Napětí při ohybu je rozloženo nelineárně, ale při odlehčení je přibližně lineární. Dochází proto k poklesu napětí, které je úměrné zkrácení na vnější straně ohybu a prodloužení na vnitřní straně ohybu [1]. Toto zpětné odpružení se vyjadřuje tzv. úhlem odpružení nebo změnou poloměru ohybu.

Při ohýbání trubek je za potřebí znát i velikost momentů, které se liší podle použitého způsobu ohýbání. Základním momentem je moment potřebný k překonání plastické deformace trubky. Další momenty jsou potřebné především k překonání tření v různých mechanismech (podle způsobu ohýbání).

Nejběžnějším způsobem ohýbání trubek za studena je ohýbání navíjením na ohýbací segment s podpěrným trnem [1], bez trnu, zakružováním a ohýbání na lisech.



Obr.8 Ukázka ohybu ocelových trubek za studena [6]

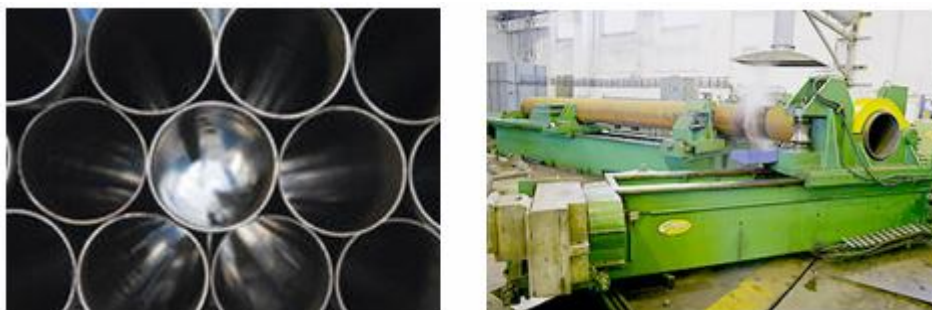
1.4.2 Ohýbání za tepla

Hlavní důvod používání ohýbání trubek za tepla je ten, že při ohýbání trubek z materiálů méně houževnatých za studena dochází k vyčerpání vnitřní přetvárné práce a materiál trubky by mohl prasknout.

Ke stejným defektům dochází i u materiálů houževnatých při malých poloměrech ohybu. A to tehdy překročí-li deformace tažnost materiálu, z něhož je trubka vyrobena. Mezi další důvody používání ohýbání trubek za tepla je potřeba vyvození velkých sil, a tím i velmi rozměrných a dimenzovaných strojů při ohýbání za studena [1].

Pevnost materiálů za tepla podstatně klesá a tím klesají i síly, které jsou zapotřebí k deformaci. Tváření za tepla charakterizuje především to, že zpevnění vznikající při tváření mizí rekrystalizací. U ocelí závisí teplota tváření za tepla na složení oceli a obsahu uhlíku [1]. Ocel by měla být tvářena v austenitickém stavu. Tedy v teplotách o 100 – 150°C pod křivkou solidu v diagramu Fe – C.

Důležité také je, aby teplota při ohýbání neklesla pod spodní mez, což je u trubek se zřetelem na jejich tenkostěnnost poměrně snadné. Volba způsobu ohýbání za tepla závisí na objemu výroby, na rozměrech ohýbané trubky a na požadovaných vlastnostech trubek v provozu [1]. Mezi nejčastější ohýbání trubek za tepla patří ohyb trubek plněných pískem a ohýbání na tvarovém trnu.



Obr.9 Ukázka ohybu ocelových trubek za tepla [7]

2. Sestavení matice proměnných zkružování trubek za tepla

Hlavními problémy, kterými trpí ohyb ocelových trubek za tepla jsou ztráta ovality profilu v místě kontaktu s pracovními kladkami, zeslabování a tvorba trhlin na vnější straně stěny při dosažení meze pružnosti a vrásnění na straně vnitřní.

Sestavením matice proměnných zkružování trubek za tepla dojde k částečnému omezení vzniku těchto deformací v průběhu ohybu trubky. Sestavení takovéto matice proměnných však závisí na mnoha vstupních a výstupních faktorech ovlivňující kvalitativní parametry výsledného ohybu.

Vstupní data musí obsahovat takové parametry, podle kterých lze provést vlastní nastavení a výpočet ohýbacího procesu. Měli by také obsahovat vybraná data určená pro verifikaci výstupů analýzy.

Výstupní a zároveň i verifikační data musí korelovat s parametry kontrolními, určenými pro monitorování průběhu ohybu a řízení ohýbacího stroje.

Soupis těchto parametrů by dále sloužil jako podklad pro nastavení ohýbacího stroje, vymezení možností samotného ohybu trubky a rizik proveditelnosti celého procesu.

2.1 Vstupní data procesu ohýbání

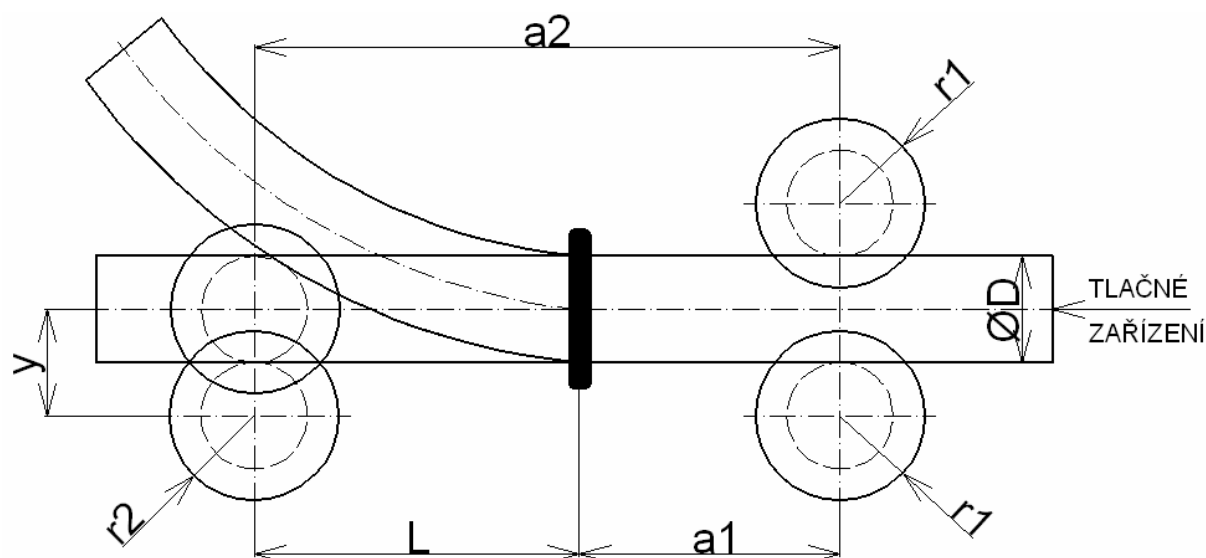
Ohýbací zařízení použité na ohýbání ocelových trubek, pro které zjišťuji limitní stavy, je koncipováno jako tlačné s ohýbací kladkou. Ohýbaná trubka je vtlačována pomocí tlačného zařízení mezi soustavu vodících kladek přes indukční ohřívací zařízení proti ohýbací kladce (obr.10).

Rozměry ohýbaných trubek jednoznačně specifikují, že jde o ohyb tenkostěnných trubek, kdy poměr průměru ohýbané trubky k tloušťce stěny je větší než 25 ($D/s > 25$). Obvykle se tyto tenkostěnné trubky ohýbají na vřetenu. A to na tuhém nebo složeném ze segmentů, popř. plněné pískem [9]. Pro bezpečné ohýbání trubek bez vřetena jsou navrhována různá doporučení eliminující případné zdeformování trubky.

Proto je kladen velký důraz na správné nastavení ohýbacího stroje, ve kterém jsou zahrnuty jak rozměry a poloha základních částí stroje, tak rozměry, poloha a rozsah nastavení hlavních funkčních částí tohoto zařízení.

Dalšími důležitými vstupními parametry jsou použité materiály, rozměry, režim a teplota ohřevu použitých polotovarů. Těmito daty se zabývám v následujících bodech práce.

2.1.1 Rozměrové nastavení hlavních funkčních částí stroje



Obr.10 Schéma kladkové ohýbačky ocelových trubek

a1	...	vzdálenost induktoru od os vodících kladek	[mm]
a2	...	osová vzdálenost vodících kladek	[mm]
r1	...	poloměr vodících kladek	[mm]
r2	...	poloměr ohýbací kladky	[mm]
y	...	hodnota posunutí ohybové kladky pro nastavení poloměru oblouku	[mm]
D	...	průměr ohýbané trubky	[mm]
L	...	délka ramena ohýbací kladky	[mm]

Rozměrové nastavení kladkové ohýbačky bude mít především vliv na konečné kvalitativní zhotovení požadovaného poloměru zaoblení trubky. Správnost zaoblení trubky ovlivňuje několik základní faktorů.

V první řadě jde o nastavení ohýbací kladky ve svislém směru, pomocí kterého nastavíme žádaný poloměr ohybu trubky. Tato vzdálenost definuje vazbu nastavení zařízení na poloměr oblouku osy trubky a je formulována vztahem dle [12] (2).

V tomto vztahu se však ještě musí zohlednit přítomnost ohřívacího zařízení, které je umístěno mezi vodícími kladkami a kladkou ohybovou (obr.10).

Nastavení zařízení dle požadovaného poloměru ohybu:

$$y = R_{\min} + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_{\min} + \frac{D}{2} + \frac{r_2}{2}\right)^2 - a_2^2} \quad (2)$$

Při zmíněném zohlednění použití ohřívacího zařízení je důležitým rozměrem nastavení vzdálenost a_1 (obr.10), která určuje jeho vzdálenost od os vodících kladek. V tomto místě ohřevu materiálu se pak bude vytvářet tzv. plastický kloub. Rovnice změní svůj tvar na:

Nastavení zařízení dle požadovaného poloměru ohybu s přihlédnutím k ohřívacímu zařízení:

$$y = R_{\min} + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_{\min} + \frac{D}{2} + \frac{r_2}{2}\right)^2 - (a_2 - a_1)^2} \quad (3)$$

y	...	hodnota posunutí ohybové kl. pro nastavení poloměru oblouku	[mm]
R_{\min}	...	minimální poloměr ohybu trubky	[mm]
D	...	průměr ohýbané trubky	[mm]
r_2	...	poloměr ohýbací kladky	[mm]
a_1	...	vzdálenost ohřívacího zařízení od os vodících kladek	[mm]
a_2	...	osová vzdálenost vodících kladek	[mm]

Při přehlédnutí tohoto aspektu by mohlo dojít k ohýbání oblouku trubky na menší poloměr ohybu. Také může vyvolat zhoršení ovality a porušení tvarové přesnosti oblouku.

Součástí výpočetních vztahů (2), (3) je i minimální poloměr ohybu, včetně předpokládaného odpružení materiálu trubky. Tento výpočetní vztah je ve větší míře popsán v bodě 2.2.1, technologické parametry.

Druhým důležitým faktorem při nastavení hlavních funkčních částí ohýbacího stroje je vzdálenost $a_2 - a_1$, zakótovaná na schématu kladkové ohýbačky jako vzdálenost L, délka ramena ohýbací kladky (obr.10). Jedná se o minimální vzdálenost ohýbací kladky od induktoru, která je omezena tuhostí prstence při kontaktu trubky a ohýbací kladky. Při tomto kontaktu dochází k přenosu síly, která vzniká odporem proti pohybu [12].

Reakci vzniklou na ohýbací kladce lze stanovit pomocí rovnice (4).

$$\text{Reakce na ohýbací kladce:} \quad F_{kl.o.} = \frac{\sigma_p \cdot W}{L} \quad (4),$$

$$\text{kde:} \quad \sigma_p = C \cdot e^n \quad (5),$$

$$e = \ln \left[\left(R + \frac{D}{2} \right) / R \right] \quad (6),$$

$$R \geq R_{\min} = 4 \cdot k \cdot (D - s) \quad (7),$$

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot D^3 \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad (8).$$

$F_{kl.o.}$...	reakce na ohýbací kladce	[N]
σ_p	...	přetvárný odpor v ohybu	[MPa]
W	...	modul odporu průřezu v ohybu	[mm ³]
L	...	délka ramena ohýbací kladky	[mm]
C, n	...	materiálové konstanty	[-]
e	...	deformace	[-]
R	...	poloměr ohybu v ose trubky	[mm]
k	...	koeficient	[-]
D	...	průměr trubky	[mm]
s	...	tloušťka stěny trubky	[mm]
d	...	vnitřní průměr trubky	[mm]

Relací rovnic (4) až (8) docílíme výpočtu minimální hodnoty ramena kladky, tj. vzdálenost kladky od induktoru.

Výsledek výpočtu reakce na ohýbací kladce pak využijeme ve vztahu při stanovení průhybu prstence v místě kontaktu trubky s ohýbací kladkou. Obecně se průhyb prstence na poloměru spočítá dle rovnice:

$$\text{Tuhost prstence:} \quad \Delta r = 0,0745 \cdot \frac{F \cdot r^3}{E \cdot I} \quad (9),$$

$$\text{kde:} \quad I = \frac{b \cdot s^3}{12} \quad (10),$$

$$r = (D - s)/2 \quad (11).$$

Δr	...	průhyb prstence	[mm]
F	...	reakce na ohýbací kladce	[N]
r	...	poloměr středního vlákna prstence	[mm]
E	...	modul pružnosti	[MPa]
I	...	moment setrvačnosti v průřezu	[mm ⁴]

Modul pružnosti je nutno do výpočtu zahrnout podle aktuální teploty ohřevu materiálu. V okolí austenitizační teploty se jeho hodnota snižuje podle druhu použité oceli až na hodnotu kolem 164 000 MPa.

Velikost pracovních tvarových kladek je učena pro každý průměr ohýbané ocelové trubky samostatně.

2.1.2 Materiály a rozměry polotovarů

Pro výrobu trubek se používá velké množství jakostních ocelí. Mezi nejpoužívanější materiály patří oceli třídy 11, které jsou charakterizované jako uhlíkové nelegované konstrukční oceli se zaručenou čistotou a minimální pevností v tahu, mezí kluzu a tažností (např. 11 353, 11 523). Dále pak oceli třídy 12 patřící mezi ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli, které v porovnání s předešlou třídou mají lepší a vyrovnanější vlastnosti, vyšší čistotu a zaručené chemické složení (např. 12 022, 12 040). Ale i oceli zahraničních ekvivalentů jako jsou např. oceli P235, P265, ST37, L245MB. Tato ocel dodávaná na výrobu trubek musí být plně uklidněná, bez zjevných vad na povrchu.

Jedním z hlavních výrobních mechanismů výroby trubek je zkružení ocelových plechů a svaření vhodnou metodou podélným, příčným nebo spirálovým svarem. Používá se většiny způsobů tavného svařování. Trubky jsou svařovány automaticky pod tavidlem, automaticky v ochranné atmosféře směsného plynu a ve zvláštních případech je možné svařovat i ručně. Dalším možným způsobem výroby je pomocí válcování za tepla, kdy přehřátý ingot putuje procesem výroby přes hydraulický lis, děrovací válcovací stroj a kalibrovací stolicí, kde získá přesný vnější průměr a kruhovitost.

Vstupní materiálová data tvoří skupina mechanických a tepelných veličin. Jedná se především o přirozený přetvárný odpor a tepelnou vodivost.

Přetvárný odpor materiálu je vlastnost materiálu vzdorovat plastické deformaci a jeho mírou je mechanické napětí (1MPa) [10]. Je funkcí několika veličin. Mezi hlavní patří stupeň deformace, rychlost deformace, teplota a stav napjatosti. Je však funkcí i materiálu a jeho chemického složení a struktury. Přirozený přetvárný odpor je zjišťován za přesně definovaného stavu napjatosti a při konstantní teplotě a rychlosti deformace. Přetvárný odpor materiálů se stanovuje pomocí zkoušek tahem, tlakem a krutem z naměřených pracovních diagramů. Výsledný přetvárný odpor materiálu se pak stanoví z tvaru závislosti skutečného mechanického napětí jako funkce plastické logaritmické deformace. Hodnoty takto zjištěných přetvárných odporů pak seřadíme do konstitutivní matice, ze které získáme křivky přetvárných odporů pro daný materiál [10].

Důležitou vlastností ohýbaného materiálu je i jeho tepelná vodivost. Jedná se o fyzikální veličinu udávající schopnost dané látky vést nebo přenášet teplo. Signalizuje rychlost, jakou se teplo šíří v materiálu. Tepelnou vodivost charakterizuje součinitel tepelné vodivosti, jehož definicí je, jaké množství tepla musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád. Při tom se předpokládá, že teplo se šíří pouze v jednom směru.

Při ohybu trubky za tepla bude mít tato veličina především význam z pohledu rychlosti ohřátí materiálu trubky na požadovanou teplotu a výdrži na této teplotě po dobu provedení ohybu na požadovaný poloměr.

Ohřátí ocelových trubek takových to rozměrů je prováděno pomocí indukčního ohřevu.

Indukční ohřev materiálu je realizován pomocí cívky vytvářející vysokofrekvenční magnetické pole, které indukuje vířivé proudy a ohřívá materiál uprostřed cívky.

V principu se jedná o transformátor, kde primární vinutí tvoří induktor, jímž protéká primární proud. Ohříváný materiál představuje sekundární vinutí s jedním závitem spojeným nakrátko. Indukční ohřev kovových materiálů je technologicky progresivní technologie, které se využívá v mnoha průmyslových odvětvích. Jde dále např. o tavení kovů, letování kovových dílů, kalení a lisování za tepla. Hlavními přednostmi indukčního ohřevu jsou:

- Možnost řízení intenzity ohřevu a rozložení teploty,
- povrchové vrstvy nejsou ohroženy chemickými změnami jako při ohřevu plamenem, nevznikají žádné produkty spalování, které mohou být i toxické [11].



Obr.10 Indukční ohřev ocelové trubky

Teplota ohřevu trubky se liší použitím dané jakosti oceli. Doporučené teploty ohřevu se pohybují kolem austenitizační teploty, která se stanovuje podle chemického složení oceli. Vyšší teploty na úrovni minimálních teplot ohřevu pro danou ocel se nedoporučují s ohledem na minimalizaci nadměrného poklesu tuhosti profilu a následné stability tvaru trubky [12]. Rozsah teplot se pohybuje v rozmezí 750 – 950 °C s případným chlazením.

2.2 Výstupní a verifikační data procesu ohýbání

Výstupní a verifikační data použitá v diplomové práci jsou zaměřena především na technologickou správnost provedení oblouku, tak aby koreloval s použitým materiálem při ohýbání a rozsahem rozměrů ohýbacího stroje. Kvalitativním výstupním parametrem je pak výsledná ovalita v závislosti na dosažitelných minimálních poloměrech ohybu, odchylka od tvaru profilu a deformace na povrchu trubky.

2.2.1 Technologické parametry

Technologické parametry spojené s ohybem trubek jsou kombinací materiálových a rozměrových dat. Hlavním parametrem je zde poloměr ohybu pro různě volené polotovary a materiály.

Poloměrem ohybu se rozumí vnitřní poloměr, tj. nejmenší vzdálenost povrchu materiálu od osy ohybu (obr.10). A jeho velikost je omezena v obou směrech [12].

Na volbu poloměru ohybu trubky mají vliv různé požadavky. Z hlediska proudění materiálu je výhodné volit poloměry ohybu co největší. Podobně i z hlediska výroby je ve většině případů dosažení většího poloměru ohybu snazší, než dosažení malých poloměrů. Správné provedení ohybu zaleží i na zkušenostech získaných v praxi, protože jednotliví činitelé ovlivňující minimální poloměry značně kolísají [1].

Největším poloměrem ohybu je dán nutností, aby v krajních vláknech průřezu došlo k trvalému přetvoření [12]. Naproti tomu je nejmenší poloměr ohybu závislý na tažnosti materiálu a vzniku trhlin na vnějším poloměru ohybu. Protažení vnějších vláken trubky by neměli překročit hodnoty prodloužení při trhací zkoušce.

Výpočet minimálního poloměru ohybu trubky se v odborných literaturách povětšinou nepatrně liší. Je to dáno především různým použitím ohýbacích technologií. Pro ohyb za tepla je také nutné akceptovat vliv poklesu tuhosti trubky s rostoucí teplotou ohřevu. Vztah pro stanovení poloměru dle [12] má tvar:

$$\text{Minimální poloměr ohybu: } R_{\min} \geq 4 \cdot k \cdot (D - s) \quad (12)$$

R_{\min}	...	minimální poloměr ohybu	[mm]
k	...	materiálový koeficient min. poloměru	[-]
D	...	průměr trubky	[mm]
s	...	tloušťka stěny trubky	[mm]

Materiálový koeficient minimálního poloměru použitý ve výpočtovém vztahu (12) se určuje především s ohledem na použitou technologii ohýbání. Pro ohyb za studena se tento koeficient pohybuje v rozmezí 0,7 – 1. Pro ohyb za tepla je v publikacích doporučován minimálně 1,8 a vyšší. Tento koeficient je vázán na chemické složení použitého materiálu při ohybu. Při dodržení přípustné teploty ohřevu v blízkosti austenitizační hranice se v praxi vazba na chemické složení zanedbává.

Výpočet minimálního poloměru ohybu je úzce svázán i s rozměry nastavování ohýbací kladky. Především s vysunutím ohýbací kladky, délkou ramena ohýbací kladky a rychlosti posuvu ohýbané trubky.

2.2.2 Výstupní parametry

Hlavním výstupním parametrem ohýbání trubek je výsledný tvar a rozměry oblouku. Důležitým faktorem výsledné kvality oblouku jsou i možná deformace vzniklá na povrchu a průřezu materiálu a ovalita v závislosti na dosažitelných minimálních poloměrech ohybu.

Příčina vzniku vad ovality je především spojena s borcením tvaru v místě kontaktu s pracovními kladkami. Bezprostřední příčinou je velké silové působení v kontaktu a překročení hodnoty dovoleného namáhání prostorového útvaru trubky. Výsledná ovalita je spojena s ohřevem materiálu v těsné blízkosti induktoru, která vede ke značnému poklesu tuhosti soustavy. Tato teplota ohřátí materiálu se pohybuje v rozmezí 750 – 950°C, dle zvoleného druhu jakosti oceli, popsané v bodě 2.1.2.

Přílišné překračování teplot ohřevu nad uvedený rozsah se obecně nedoporučuje. Ztráta stability tvaru je rychlejší a citlivější na výkyvy při běžných výrobních podmínkách. V neposlední řadě je při vyšších teplotách intenzivnější oblast okují, hrubnutí zrna a podobné negativní vlivy [12].

Konečným efektem je odchylka ovality výrazně překračující povolenou mez. Tato hranice povolené ovality není stálá a mění se podle požadavků zákazníka. Nejčastěji se pohybuje v mezi 6 – 8%.

Pro odchylku ovality se nejčastěji používá vztah, který je uveden v bodě 1.3.2 (1).

3. Specifikace limitních parametrů zkružování trubek

Limitní parametry zkružování trubek za tepla jsou závislé na mnoha faktorech, které ovlivňují výslednou kvalitu provedení ohybu. Hlavními limitujícími parametry při ohybu vycházejí z konstrukčního provedení ohýbacího stroje a z materiálových vlastností použité jakosti oceli. Mezi tyto limity patří:

- Délka ramena ohýbací kladky L (obr.10),
- hodnota posunutí ohybové kladky pro nastavení poloměru oblouku y (obr.10),
- rychlost posuvu trubky v ,
- teplota ohřevu materiálu T .

3.1 Nastavení hlavních limitních parametrů

Uvedené limitující parametry jsou zároveň i parametry regulujícími, pomocí kterých můžeme při samotném ohybu ovlivňovat jeho průběh a následný výsledek.

3.1.1 Délka ramena kladky a účelné nastavení kladek

Délka ramene ohýbací kladky znázorněné na obr.10 je limitující především z hlediska konstrukčního provedení ohýbacího stroje a rozměrů ohýbané trubky. Tato kladka je strukturována jako posuvné rameno jehož maximální možné vysunutí dosahuje přibližně dvou metrů.

Minimální hodnotu ramena kladky lze stanovit z relace rovnic (4) až (8), tedy minimální vzdálenost kladky od ohřívacího induktoru.

Samotné nastavení ohýbací kladky je realizováno v podélném a příčném směru podle žádaného poloměru ohybu dle vztahu (3) [12]:

$$y = R_{\min} + \frac{D}{2} + r_2 - \sqrt{\left(R_{\min} + \frac{D}{2} + \frac{r_2}{2}\right)^2 - (a_2 - a_1)^2}$$

Vztah pro kinematické nastavení zkružování je pouze orientační, vzhledem k existujícímu odpružení [12].

Ovlivňujícím faktorem je zde teplotně proměnný modul pružnosti. Proto je nutné provádět korekci za provozních podmínek a to podélném i příčném směru.

Pro určení dynamických ohýbacích parametrů lze využít vztahů klasického typu, které jsou určené pro výpočet momentů a sil při zkružování profilů [12]. Potřebný ohybový moment vychází ze vztahu pro plastický ohyb:

Plastický ohybový moment:
$$M_o = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W}{(2 + n)} \quad (13)$$

M_o	...	ohybový moment	[N.m]
σ_p	...	přetvárný odpor v ohybu	[MPa]
W	...	modul průřezu v ohybu	[mm ³]
n	...	exponent zpevnění materiálu	[-]

Přítlačnou sílu vodící kladky lze stanovit z modifikovaného vztahu:

Přítlačná síla vodící kladky:
$$F_{kl.v.} = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W}{[2 \cdot (1 + n) \cdot R]} \quad [N]$$

Přítlačná síla ohýbací kladky lze stanovit ze vztahu upraveného pro zkružování:

Přítlačná síla ohýbací kladky:
$$F_{kl.o.} = \frac{3 \cdot \sigma_p \cdot W}{[(1 + n) \cdot R]} \quad [N]$$

σ_p	...	přetvárný odpor v ohybu	[MPa]
W	...	modul průřezu v ohybu	[mm ³]
n	...	exponent zpevnění materiálu	[-]
R	...	poloměr ohybu v ose trubky	[mm]

Při běžném zkružování je přenášen kroutící moment na hnacím válci třením na zkružovaný profil. Vzhledem k tomu, že v daném případě je vyvíjen tlak tečný k ohýbanému kruhovému oblouku, lze uvažovat koeficient tření roven 1.

Klasický způsob výpočtu tedy předpokládá rovnost silových reakcí na vodící a ohybové kladce stejný [8].

V provozu je kladena podmínka maximální síly působící na každou z kladek samostatně. Tato podmínka vyplívá z konstrukce stroje a jeho tuhosti. Síla na kladce by neměla překročit stanovenou mez 1 [MN].

3.1.2 Rychlost posuvu trubky a teplota ohřevu materiálu

Rychlost posuvu ohýbané trubky je úzce spojena s teplotou ohřevu daného materiálu. Samotný ohřev je závislý zejména na rozměrech ohýbané trubky, především na jejím průměru a tloušťce stěny. Ohřev musí být proveden tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné prohřátí v celém průřezu trubky. Rychlost posuvu musí být tedy podřízena rychlosti ohřevu materiálu, tak aby nedocházelo ke vzniku tepelných pásů, ve kterých se často nerovnoměrné prohřátí objevuje.

Důležitou součástí při stanovení optimální rychlosti posuvu je i rychlost plastické deformace materiálu, při které dochází k trvalé deformaci díky posunu atomů mezi sebou o vzdálenost větší než činí parametr mřížky.

Struktura tvářeného kovu ovlivňuje plastické vlastnosti a průběh deformace jednak velikostí svých zrn, ale také svojí stejnorodostí a mezikrystalickou hmotou. Obecně platí, že s klesající velikostí zrn vzrůstá deformační odpor. Zhoršují se tedy plastické vlastnosti materiálu.

V praxi se nejčastěji volí teplota ohřevu materiálu v rozmezí 750 – 950 °C, dle jakosti materiálu. Následná volba rychlosti posuvu trubky se v provozu pohybuje v mezích 20 – 50 mm/min podle shora popsaných činitelů.

Uvedené limitní parametry pro vhodné nastavení a provedení výpočtů musí korelovat s rozměrovými hodnotami ohýbané trubky a zároveň s vlastnostmi zvoleného materiálu. Přesné sestavení takové to kombinované závislosti je složité a platnost je omezena nezávisle i závisle proměnnými veličinami.

4. Analýza technologie zkružování trubek za tepla pro materiálové reprezentanty

Diplomová práce je zaměřena na problémy současného ohýbání ocelových trubek za tepla a jejich možnými tvarovými deformacemi.

Na vznik deformací a ztráty kontur profilu má vliv velmi mnoho faktorů. Tyto činitele jsou spojeni především se zvoleným materiálem ohýbané trubky a jeho ohřevem a s volbou nastavení ohýbacího stroje v provozu.

Analýza technologie zkružování trubek byla provedena metodu konečných prvků MKP (Finite Element Metod – FEM) pomocí softwarového produktu od firmy Quantor Ltd. s názvem QForm 3D.

4.1 Řešení pomocí MKP a popis simulačního programu QForm

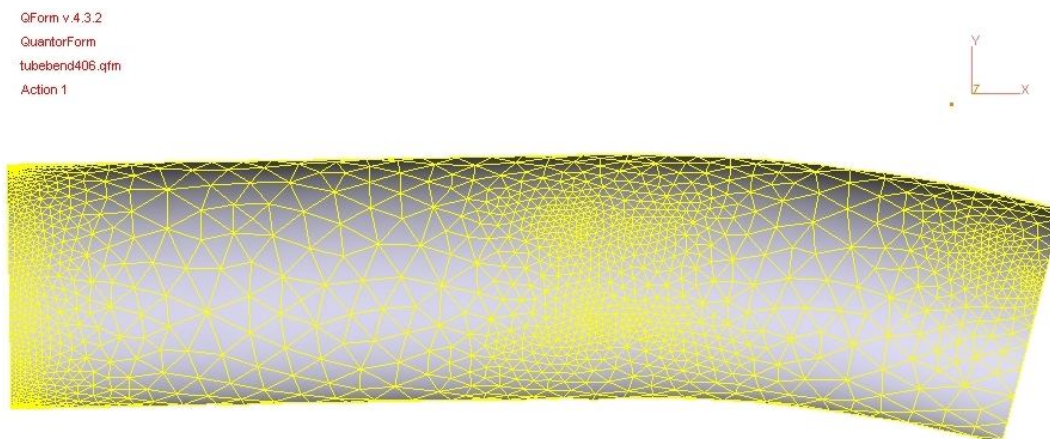
Metoda konečných prvků (Finite Element Metod – FEM) je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Metoda pokrývá celou šíři fyzikálních aplikací: statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, piezoelektrické jevy a proudění.

Základním principem MKP je diskretizace (rozdělení) tělesa na malé části (prvky), které jsou snadno matematicky popsateľné [13]. Z matematického hlediska je MKP používaná pro nalezení aproximovaného řešení parciálních rovnic (PDR) i integrálních rovnic. Postup řešení je založen na úplné eliminaci diferenciální rovnice (stacionární úlohy) nebo na převedení PDR na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici. Ta je následně řešena standardními postupy jako např. metodou konečných diferencí a další.

Při řešení parciálních diferenciálních rovnic je základním krokem sestavení rovnice, která aproximuje řešenou rovnici, a která je numericky stabilní ve smyslu, že chyby ve vstupních datech a pomocných výpočtech se neakumulují na nevedou tak k nesmyslným výsledkům.

Pro analýzu řešení byl použit výpočtový software QForm 3D, který je určen pro simulaci a analýzu tvářecích procesů v 3D prostředí. QForm (Quick Metal Forming Simulation) představuje generaci softwaru pro simulaci tváření za tepla i za studena.

Vstupní data potřebné k simulaci jsou omezena na minimum. Výpočtový software vytváří na tvářené součásti síť (obr.11), jejíž složitost a hustota je závislá na přesnosti simulace.



Obr.11 Síť konečných prvků softwaru QForm

Simulace poskytuje informace o rozdělení toku materiálu, jeho teploty, deformace, síle a energii v procesu tváření. Výsledky simulace jsou zobrazovány současně s postupem simulace. Uživatel má také možnost animovat výsledky simulace v režimu přehrávání. Model tváření kovů realizovaný v QForm odpovídá jedna ku jedné reálnému procesu tváření [14].

4.2 Volba materiálu a rozměru trubek

Pro vyhodnocení výsledků simulace pomocí softwaru QForm jsem využil jako materiálu trubky uhlíkové oceli s označením 12 040 dle ČSN 41 2040 se specifickými rozměrovými vlastnostmi. Jako vstupní rozměrová data ocelových trubek byli využity tyto ocelové trubky:

Tab. 1 Použité rozměry ocelových trubek

číslo trubky	materiál dle ČSN 41 2040	vnější průměr D [mm]	tloušťka stěny s [mm]
1	12 040	377	16
2	12 040	406	45

Tab. 2 Chemické složení zvoleného materiálu

Dle normy		Chemické složení [%]							
ČSN 41 2040	EN 10083-2-91	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
12 040	C35	0,32- 0,40	0,50- 0,80	0,15- 0,40	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040

Tab. 3 Mechanické vlastnosti zvoleného materiálu

ČSN 41 2040	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Modul pružnosti E [GPa]	Modul pruž. ve smyku G [GPa]
12 040	315	min.530	20	206	79

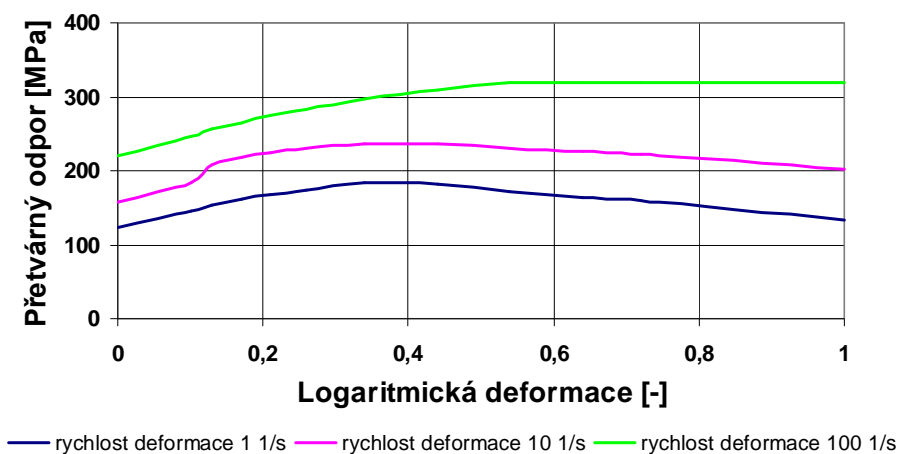
Tab. 4 Fyzikální vlastnosti zvoleného materiálu

ČSN 41 2040	Hustota ρ [kg.m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplotní roztlačnost α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_τ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Rezistivita ρ [Ω.m ⁻¹]
12 040	7850	/	$11,9 \cdot 10^{-6}$	49	$120 \cdot 10^{-9}$

Tab.5 Konstitutivní matice pro materiál 12 040

Teplota	900°C	Logaritmická deformace (-)					
		0	0,1	0,13	0,17	0,21	0,26
Rychlost deformace [1/s]	1	123,8	145,8	153,7	161,7	167,7	174,7
	10	157,7	183,7	207,7	217,6	223,6	229,6
	100	219,6	245,6	255,6	265,6	275,5	283,5

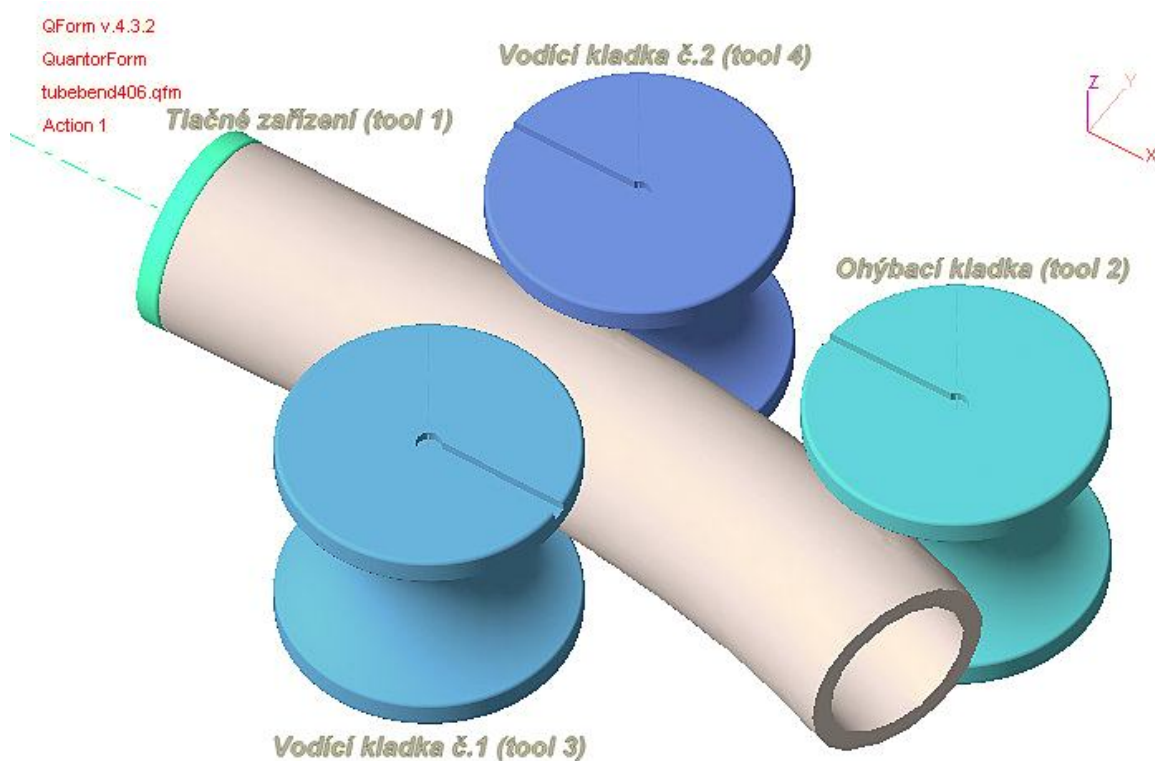
Logaritmická deformace (-)					
0,34	0,44	0,54	0,64	0,72	1
183,7	181,7	171,7	163,7	159,7	133,7
235,6	235,6	230,6	226,6	222,6	201,6
297,5	308,5	318,5	319,5	319,5	319,5

Obr. 12 Křivky přetvárných odporů (12 040, $T=900^\circ\text{C}$)

4.3 Model

Geometrický model pro ohýbání trubky zkružováním v ohýbacím stroji, který je sestaven pro analýzu metodou konečných prvků, je zobrazen na obr. 12. Jako vstupní data pro vytvoření prostorového modelu v programu QForm byly použity rozměrové a materiálové parametry ocelových trubek sepsané v bodě 4.2.

Model byl navržen dle výrobního zařízení používaného v praxi. Je tedy sestaven jako tlačné zařízení s ohýbací kladkou a dvěma kladkami vodícími (obr.13).



Obr.13 Model procesu ohýbání trubek (D406 – 45, 12 040)

Pro zjednodušení a zrychlení výpočtu simulace byl model ocelové trubky před samotným procesem ohýbání ohřán na teplotu 900 °C a předehnut. Tato zjednodušení byla provedena pro obě varianty ocelových trubek (D377 – 16, D406 – 45, materiál 12 040).

Materiálový model použitého ekvivalentu oceli 12 040 byl sestaven z konstitutivní matice přetvárných odporů pomocí výpočtového softwaru QForm.

Během simulace procesu ohýbání byly provedeny obrazové výstupy rozložení důležitých veličin pro obě rozměrové charakteristiky ocelových trubek:

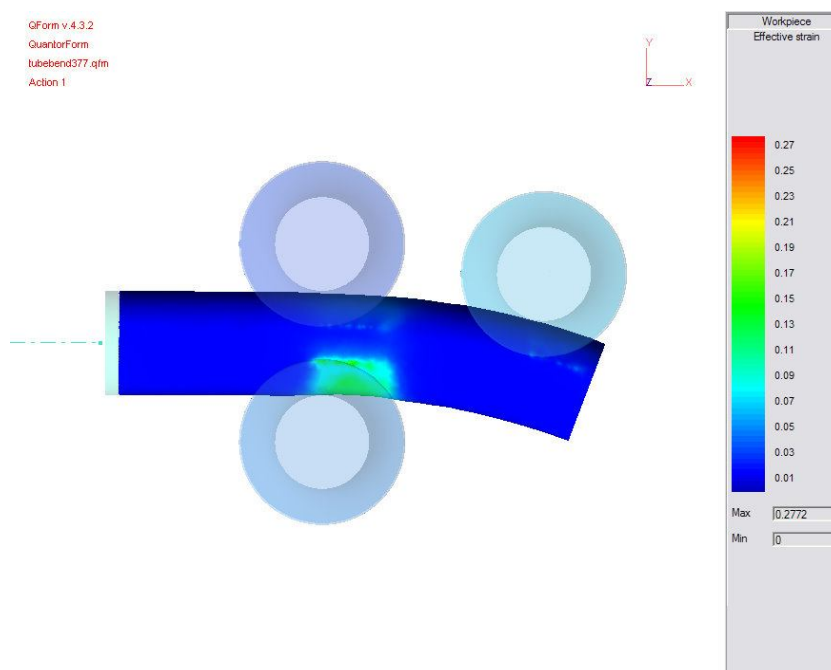
- Efektivní deformace (Effective strain),
- střední napětí (Mean stress).

Obrazové výstupy jsou pro názornost zobrazeny v příčném řezu ocelové trubky a v celkovém pohledu simulačního modelu s kladkami.

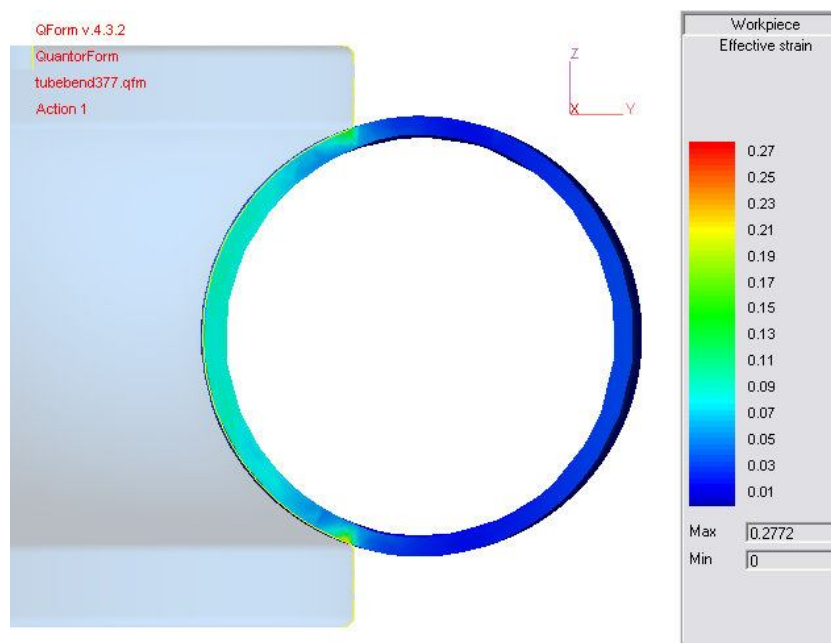
Důležitým výstupním parametrem zadané analýzy ohýbání trubek za tepla jsou i konečné síly (reakce) působící v hlavních částech ohýbacího zařízení, tedy vodící a ohýbací kladky. Výpočtem pomocí MKP a simulací v programu QForm bylo zjištěno, že maximální síly působí na vodící kladku č.1 (tool 3) (obr.12). Průběhy těchto sil jsou pro obě rozměrové varianty a materiál vyneseny v grafech.

4.3.1 Deformační napětí

a) Ocelová trubka č.1 (D377 – 16)



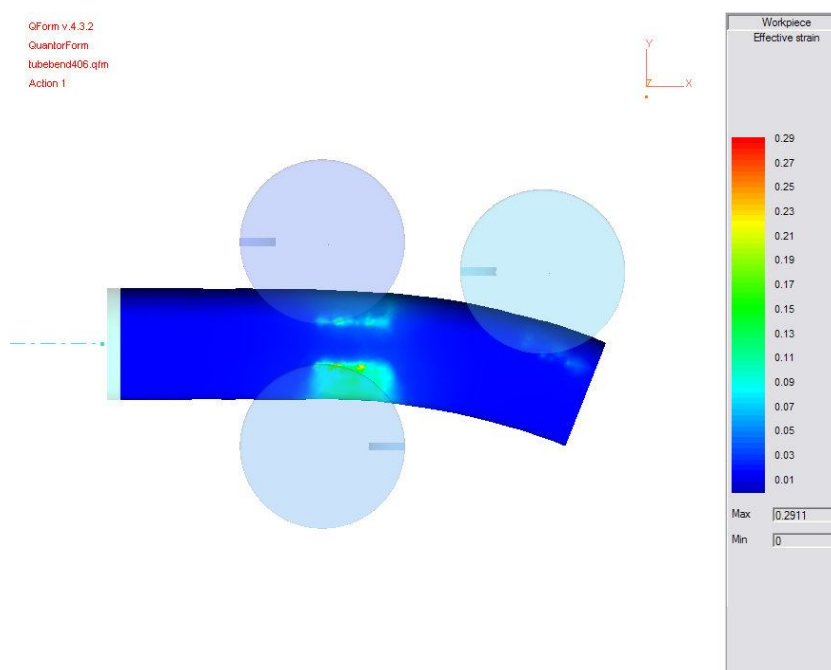
Obr.14 Průběh deformačního napětí – celkový pohled



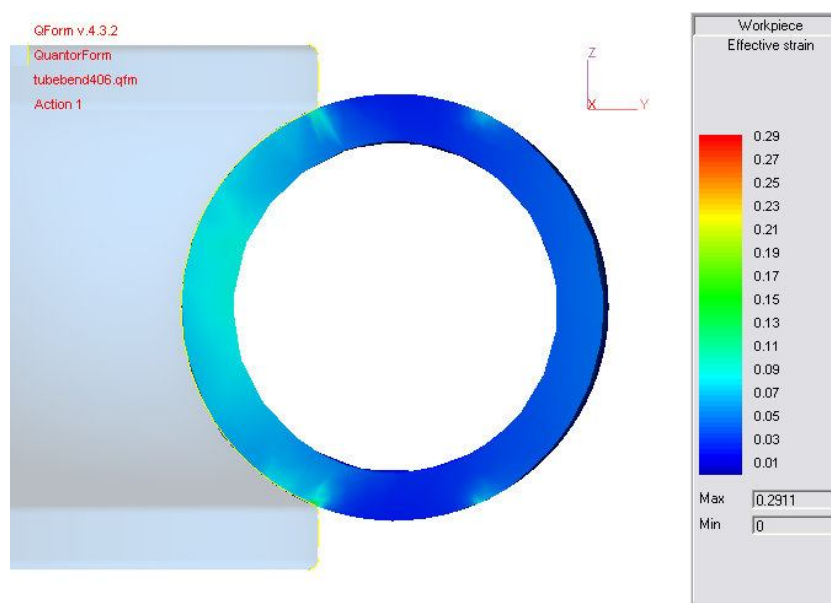
Obr.15 Průběh deformačního napětí – příčný řez trubkou

K největšímu nárůstu deformačního napětí u trubky č.1 (D377 – 16) dochází v místě kontaktu s vodící kladkou č.1 (tool 3) (obr.15). Napětí roste především na okrajích tvarového zaoblení vodící kladky. Deformační napětí v tomto kritickém místě dosahuje hodnoty 0,277 [-] a způsobuje tvarovou deformaci trubky na povrchu materiálu.

b) Ocelová trubka č.2 (D406 – 45)



Obr. 16 Průběh deformačního napětí – celkový pohled



Obr.17 Průběh deformačního napětí – příčný řez trubkou

Stejně jako u ocelové trubky č.1 (D377 – 16) dochází i u simulace ohybu ocelové trubky č.2 (D406 – 45) k nárůstu deformačního napětí především v místě kontaktu s vodící kladkou č.1 (tool 3). V nejvíce deformovaném místě ohybu dosahuje deformačního napětí hodnoty 0,291 [-].

4.3.2 Střední napětí

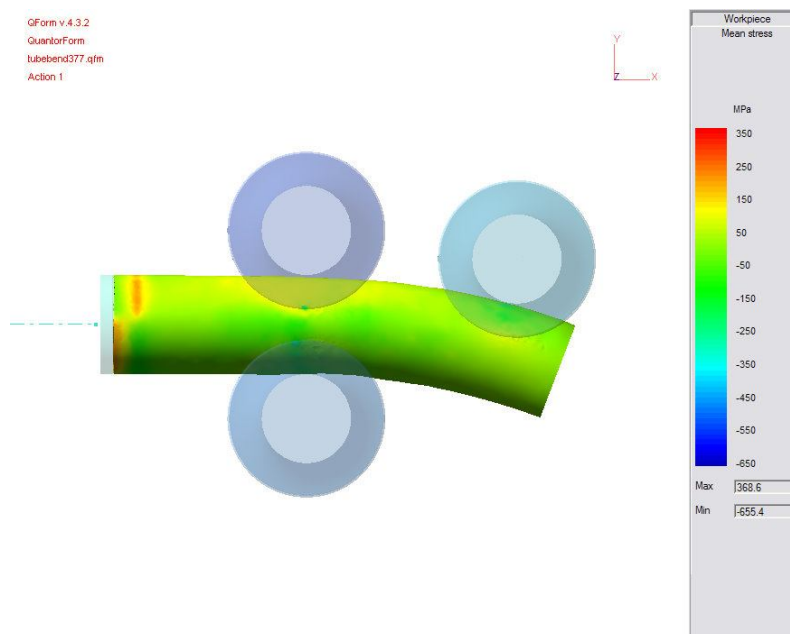
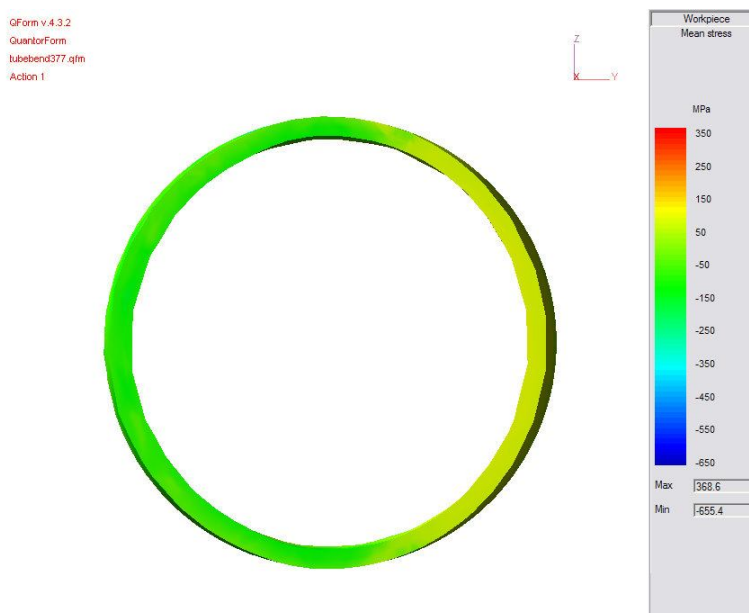
Průběh středního hydrostatického napětí udává rozložení napětí, které je při ohybu ocelové trubky vyvoláno ohybovým momentem.

V průběhu ohybu jsou krajní vlákna na vnitřní straně trubky namáhána největším tlakovým napětím, které je na obrazovém výstupu získaného z programu QForm označeno pomocí zelené barvy na příčném průřezu trubky.

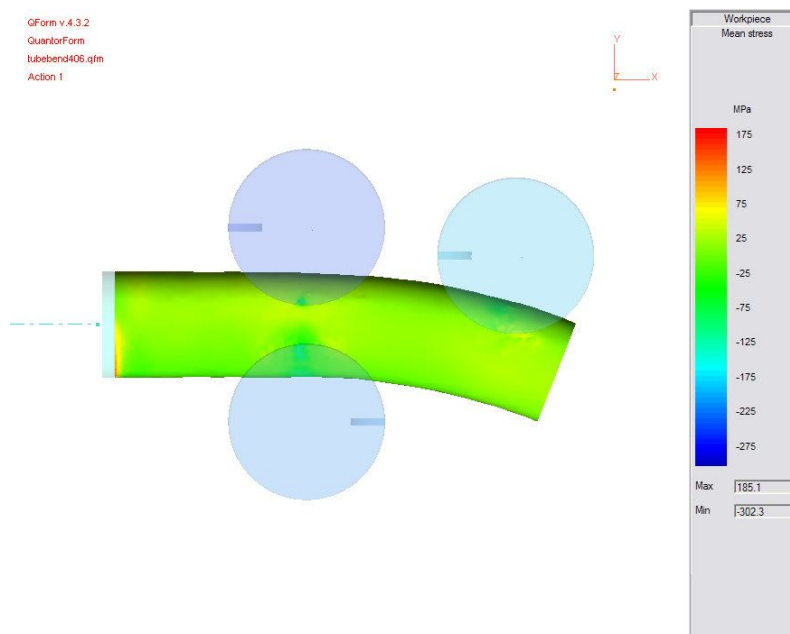
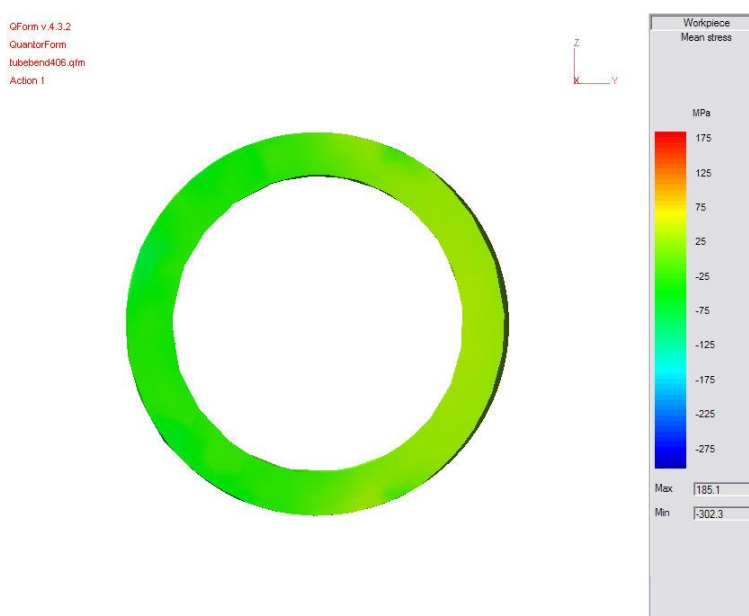
Směrem k neutrální ose tlakové napětí klesá, až dosáhne nuly. Od tohoto místa se mění na napětí tahové působící na krajních vláknech vnější strany trubky. Tahové napětí je na obrazových výstupech simulace znázorněno žlutou barvou.

V průběhu simulace ohybu u zvolených ocelových trubek nedošlo k žádnému neočekávanému rozložení středního napětí.

Maximální hodnota tlakového napětí je vyvozena na okraji ocelové trubky v místě, kde na ni působí síla tlačné kladky. Napětí zde dosahuje hodnoty 368,6 [MPa].

a) **Ocelová trubka č.1 (D377 – 16)****Obr.18 Průběh středního (hydrostatického) napětí – celková pohled****Obr.19 Průběh středního (hydrostatického) napětí – příčný řez trubkou**

V místě ohybu se však hodnota středního napětí pohybuje okolo 120 [MPa] při tlaku na vnitřní straně trubky a 90 [MPa] při tahu na vnější straně ocelové trubky.

a) **Ocelová trubka č.2 (D406 – 45)****Obr.20 Průběh středního (hydrostatického) napětí – celkový pohled****Obr.21 Průběh středního (hydrostatického) napětí – příčný řez trubkou**

U ocelové trubky č.2 (D406 – 45) dochází k mírnému poklesu středního napětí, které je dáno rozměry ohýbané trubky. Maximální hodnota je opět vyvozena na okraji trubky v místě kontaktu s tlačnou kladkou a je rovna 185,1 [MPa].

V místě ohybu střední napětí opět klesá na hodnotu okolo 80 [MPa] při tlaku na vnitřní straně trubky a 25 [MPa] při tahu na straně vnější.

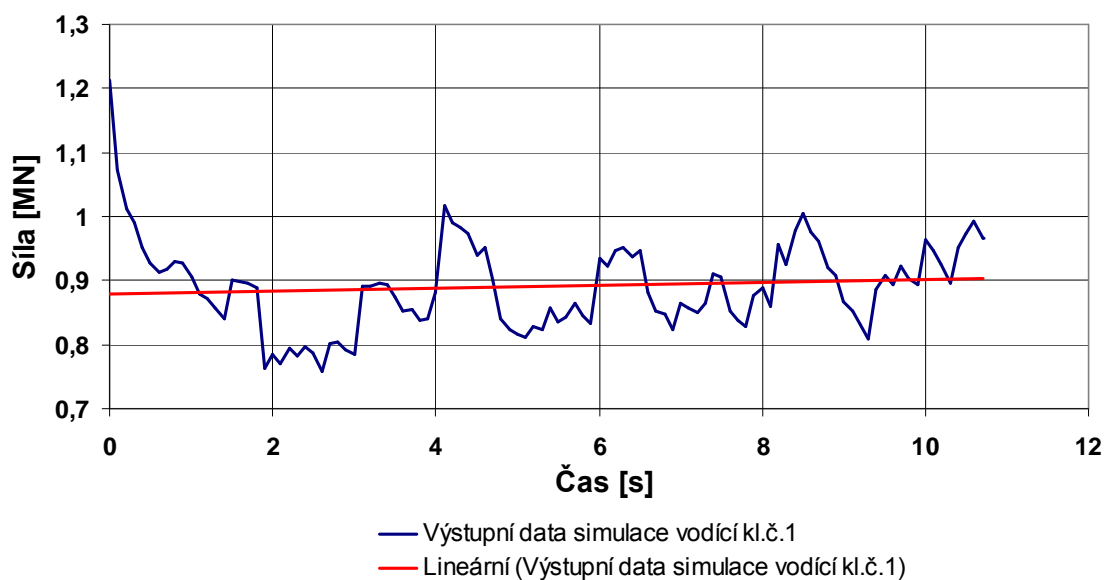
4.3.3 Reakce působící v hlavních částech ohýbacího stroje

a) Ocelová trubka č.1 (D377 – 16)

Přítlačné síly (reakce) v hlavních částech ohýbacího zařízení jsou limitující především z hlediska dodržení dohodnuté meze jejich maximálních hodnot. Tato mez byla stanovena tuhostí stroje na 1 [MN].

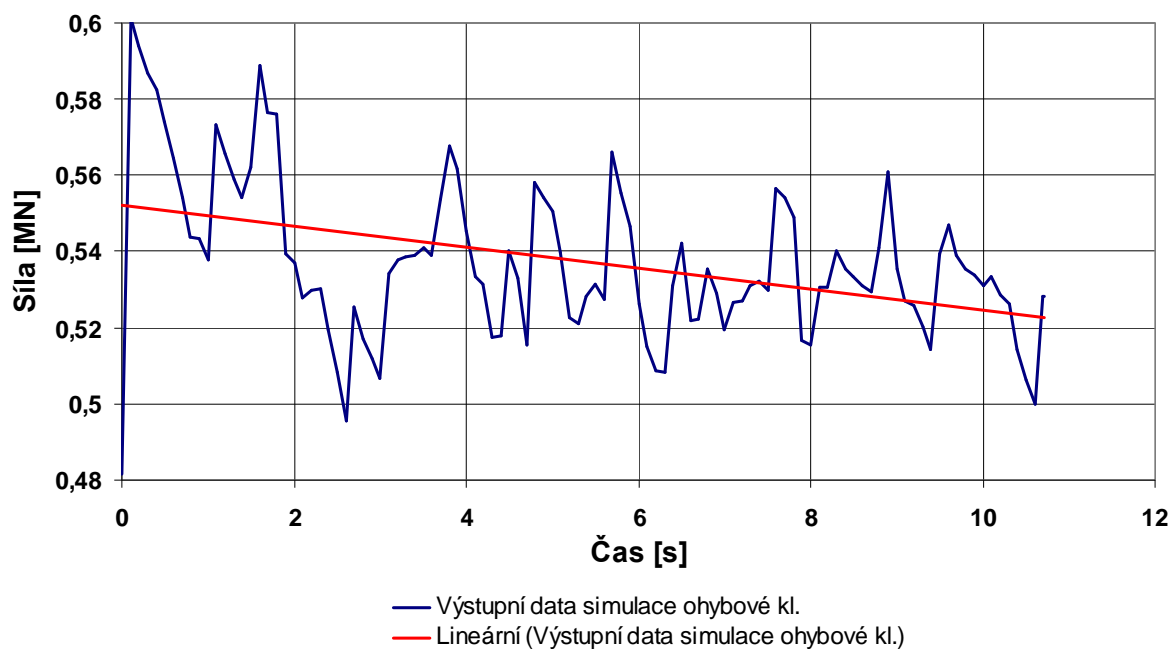
Velikost těchto reakcí má vliv na možný vznik deformací trubky v místě kontaktu s kladkou a tím zhoršení požadované ovality.

Při simulaci ohybu ocelové trubky č.1 (D377 – 16) byla zjištěna maximální hodnota reakce na vodící kladce č.1 (tool 3) (obr.12), která dosahovala hodnoty 1,213 [MN] (obr.22). Tato hodnota však byla dosažena v okamžiku náběhového maxima, která následně přechází do ustálenějších hodnot provázejících celý ohyb. Průměrná hodnota, která byla stanovena simulací a působí při ohybu nabývá hodnoty 0,891 [MN].



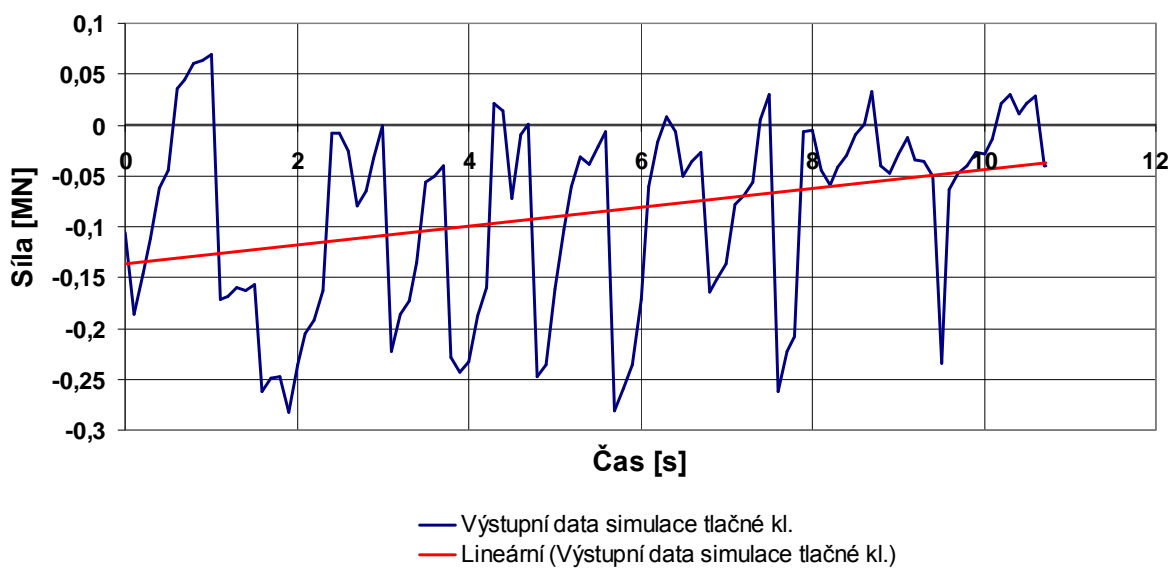
Obr.22 Závislost působící síly a času na vodící kladku č.1

Síla působící na ohybové kladce (tool 2) (obr.12) nabývá náběhového maxima o hodnotě 0,601 [MN] (obr.23), tedy o polovinu menší než u vodící kladky č.1 (tool 3). V průběhu ohybu se získané hodnoty opět stabilizují a dosahují průměrné hodnoty 0,537 [MN].



Obr.23 Závislost působící síly a času na ohybovou kladku

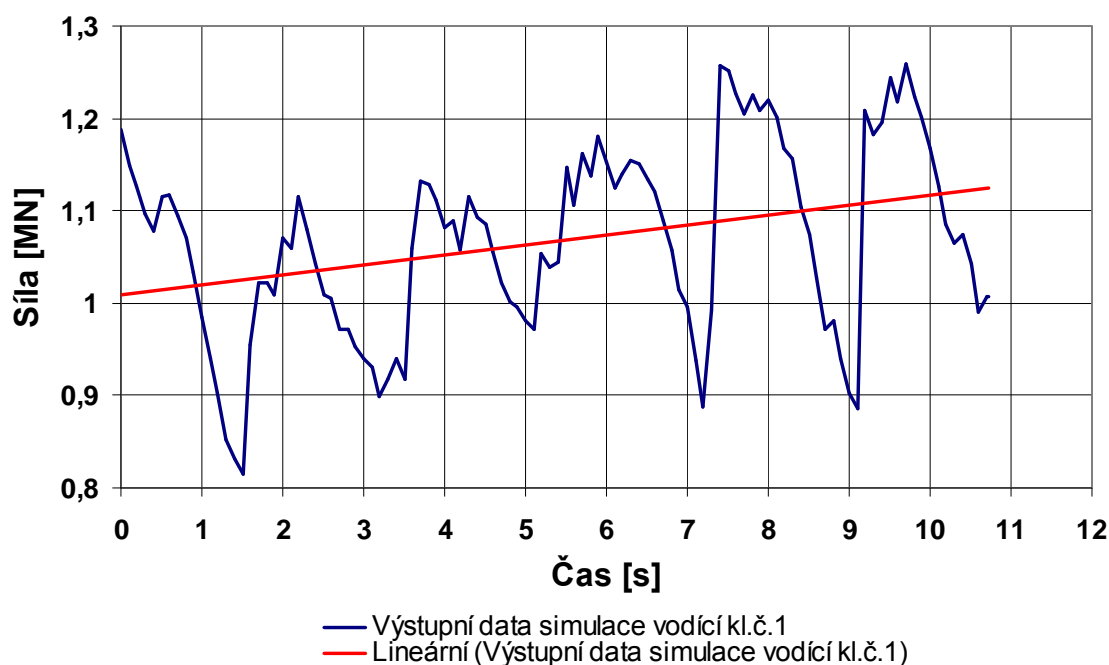
V případě tlačné kladky (tool 1) (obr.12) je dosaženo maximální hodnoty 0,069 [MN] a minimální -0,282 [MN] (obr.24). Průměrná hodnota v průběhu ohybu je -0,086 [MN].



Obr.24 Závislost působící síly a času na tlačnou kladku

b) Ocelová trubka č.2 (D406 – 45)

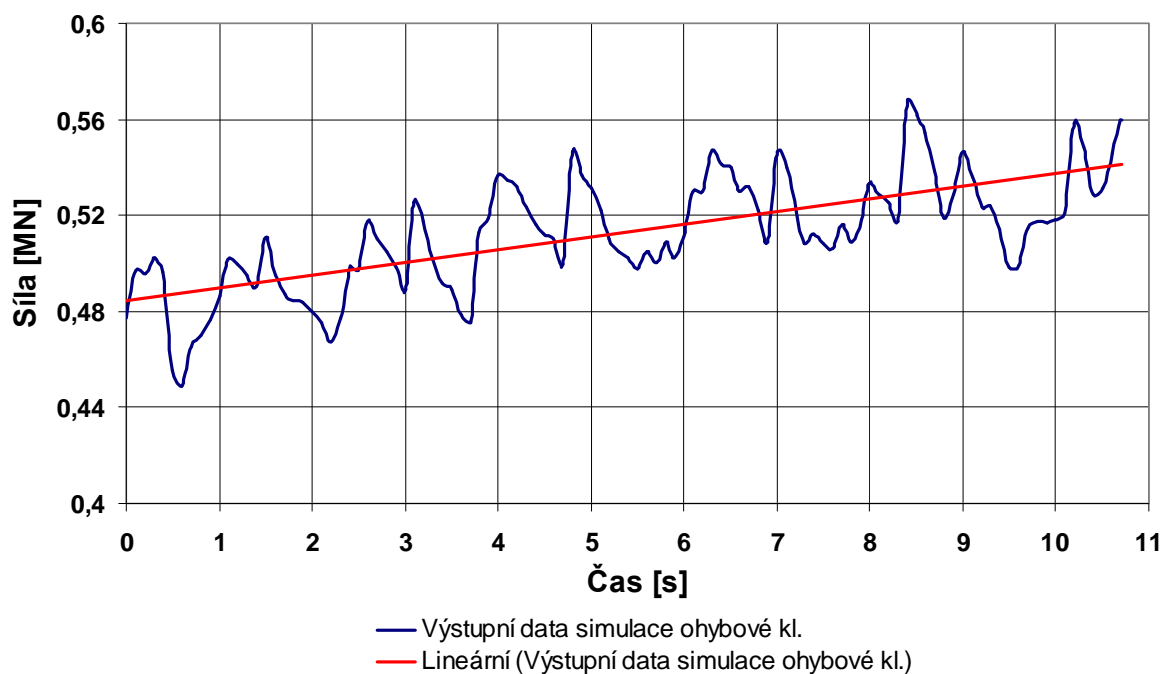
Stejně jako v prvním případě simulace ohybu, tak i ve druhém u ocelové trubky č.2 (D406 – 45) je maximální zjištěná reakce na vodící kladce č.1 (tool 3) (obr.12). Její velikost činí 1,259 [MN] (obr.25) a dosahuje jí na konci ohýbacího procesu. Průměrná hodnota při vytváření ohybu je 1,067 [MN].



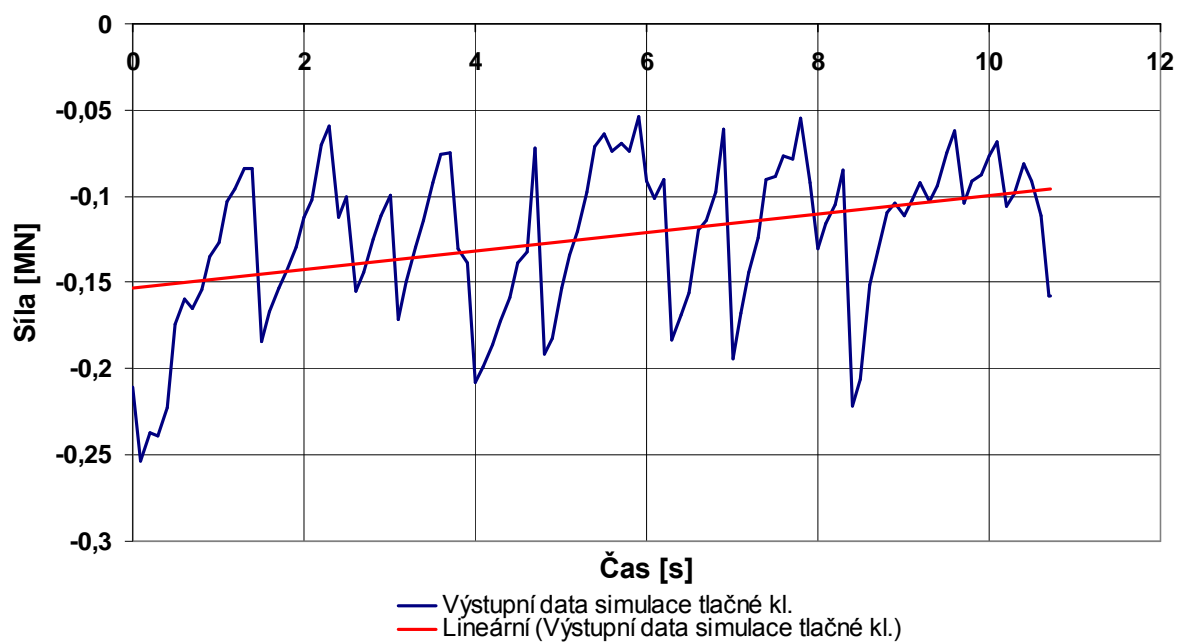
Obr. 25 Závislost působící síly a času na vodící kladku č.1

Při kontaktu ocelové trubky č.2 (D406 – 45) s ohýbací kladkou (tool 2) (obr.12) dochází k nárůstu síly do maximální hodnoty 0,567 [MN] (obr.26). V průběhu ohybu působí průměrná síla 0,513 [MN].

Reakce v tlačné kladce dosahuje maximální velikosti -0,054 [MN] a minimální -0,254 [MN] (obr.27). Průměrná hodnota působící síly v časovém úseku je -0,124 [MN].



Obr. 26 Závislost působící síly a času na ohybovou kladku



Obr. 27 Závislost působící síly a času na tlačnou kladku

5. Diskuze dosažených výsledků

Pro zjištění vzniku tvarových deformací byl vytvořen model ohybu trubky pomocí výpočetního softwaru QForm. Za podpory tohoto modelu jsem stanovil kritická místa technologie zkružování, ve kterých dochází k nárůstu deformačního napětí způsobujícího tvarovou degradaci trubky.

Analýzou technologie zkružování trubek pro vybrané materiálové reprezentanty bylo jako nejrizikovější oblast vzniku tvarové deformace určeno místo kontaktu ohýbané ocelové trubky s vodící kladkou č.1 (tool 3) (obr.13). V tomto místě kontaktu dochází k největšímu nárůstu napětí způsobují borcení tvaru a znehodnocení výsledné kvality oblouku.

Výsledné hodnoty deformačního napětí, středního napětí a sil působících v průběhu ohybu jsem seřadil do tabulek č. 6, 7.

Tab.6 Výsledné hodnoty simulace ohýbání za tepla pro trubku D377 - 16

Deformační napětí ε [-]	Střední napětí σ_d [MPa]	Střední napětí σ_t [MPa]	Max. hod. síly $F_{kl.v.}$ [MN]	Průměrná hod. síly $F_{kl.v.}$ [MN]
0,277	120	90	1,213	0,891

Tab.7 Výsledné hodnoty simulace ohýbání za tepla pro trubku D406 - 45

Deformační napětí ε [-]	Střední napětí σ_d [MPa]	Střední napětí σ_t [MPa]	Max. hod. reakce $F_{kl.v.}$ [MN]	Průměrná hod. reakce $F_{kl.v.}$ [MN]
0,291	80	25	1,259	1,067

Pro správné a bezproblémové provedení požadovaného oblouku je důležité především dodržet limitní parametry vycházející z vlastností použitých materiálů, tvaru profilu a stanovených požadavků na přesnost. Tyto limitující parametry jsou popsány v bodech 2, 3.

K částečné eliminaci vzniku tvarových deformací by došlo použitím vnitřní výplně, např. vřetene nebo písku. Tato možnost je však proveditelně velmi náročná a v praxi se u ohýbání ocelových trubek takových to rozměrů téměř nepoužívá.

6. Závěr

Celá diplomová práce se zabývá specifikací a analýzou limitních parametrů ohýbání ocelových trubek za tepla a jejich závislostí na geometrických a materiálových vlastnostech.

Pro analýzu technologie zkružování trubek za tepla byla vytvořena simulace procesu pro vybrané materiálové reprezentanty, která byla provedena pomocí výpočetního softwaru QForm 3D (Quick Metal Forming Simulation) společnosti Quantor Ltd..

V první třetině diplomové práce je detailně rozepsána teorie a používané technologie ohýbání trubek a to za studena i za tepla. Je zde popsáno rozdělení tvářecích procesů dle požadovaných parametrů, ale i rozdělení ohýbání z hlediska působení vnějších sil a momentů.

Ve druhé třetině práce se zabývám problémem limitních parametrů ohýbání trubek za tepla.

V bodě 2 se zaměřuji na sestavení matice zkružování trubek za tepla. Matice relací je sestavena s potřebnou vnitřní hustotou pro správně provedení ohybu. Tato část práce je zaměřena na vstupní a výstupní data procesu ohýbání. Především na rozměrové nastavení hlavních funkčních částí, použití materiálů, technologických parametrů nastavení poloměru ohybu a výsledného kvalitativního provedení oblouku.

V bodě 3 jsou specifikovány hlavní limitní parametry zkružování ocelových trubek. Tyto parametry jsou závislé na mnoha faktorech. Vycházejí z konstrukčního provedení ohýbacího zařízení a z materiálových vlastností použité jakosti oceli (rychlost posuvu trubky, teplota ohřevu materiálu).

V poslední třetině diplomové práce se zabývám analýzou technologie zkružování trubek pro vybrané materiálové reprezentanty.

Pro tuto analýzu je vytvořen simulační model průběhu ohýbání ocelových trubek za tepla. Pro samotné realizování simulace byl využit již zmiňovaný výpočetní software QForm 3D (Quick Metal Forming Simulation).

Pomocí tohoto výpočetního programu jsem stanovil kritická místa vzniku tvarových deformací trubky, která vznikala v průběhu zkružování a znehodnocovala kvalitu provedení oblouku.

Výsledkem diplomové práce je snaha minimalizovat nebo úplně odstranit součastné problémy spojené s tvorbou trhlin na vnějších vláknech, borcení profilu podél vnitřních vláken oblouku a ztrátě ovality ohýbané trubky.

7. Použitá literatura

- [1] VÍTEK, A.. *Ohýbání trubek*. 1.vyd. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 160 s.
- [2] PETRUŽELKA, J., SONNEK, P.. *Analýza procesu tváření za tepla : Dynamický materiálový model*. Frýdek-Místek : VŠB-Technická univerzita Ostrava, katedra mechanické technologie, 2001. 160 s. ISBN 80-248-0035 -7.
- [3] LENFELD, P.. *Technologie II - tváření kovů* [online]. 2008 [cit. 2009-03-08]. Dostupné z : <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm>
- [4] BŘEZINA, R., PETRUŽELKA, J.. *Úvod do tváření II*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2002. 116 s. ISBN 80 -248 - 0068 - 3.
- [5] BEROUN, S. *Úvod do strojírenství* [online]. c2008-2009 [cit. 2009-03-10]. Dostupné z : <http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf>.
- [6] *Tvarmetal s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2009-04-14]. Dostupné z: <<http://www.tvarmetal.cz/>>.
- [7] *Jinpo Plus a.s.* [online]. 2008 [cit. 2009-04-14]. Dostupné z : <http://www.jinpo-plus.cz/produkty-detail-c.php?zbozi_id=39&jazyk=&kat=2>.
- [8] HENZEL, A., SPITTEL, T.. *Rasčet energosilových parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. 73 s.
- [9] SEMIATIN, S.L., et al. *Metals Handbook Ninth Edition : Vol.14 Forming and Forging*. Ohio, Metals Park: ASM International : [s.n.], 1998. 665-674 s.

- [10] TOMČÍK, P., TROJAN, R.. *Laboratorní cvičení pro předmět Teorie tváření*. Ostrava : [s.n.], 2007. 66 s. Dostupné z: <[http://www.lit.vsb.cz/Učební_texty/Skripta-Teorie Tváření.pdf](http://www.lit.vsb.cz/Učební_texty/Skripta-Teorie_Tváření.pdf)>. ISBN 978–80–248–1342-4.
- [11] ČERNÝ , V.. *Odborné časopisy* [online]. 2002 [cit. 2009-04-26]. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/el100256.pdf>>.
- [12] ČABELKA, J. a kol.. *Mechanická technológia*. Bratislava: VSAV, 1967. s. 594 – 599
- [13] HRUBÝ, J. *Metoda konečných prvků - 1.panel*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 2 s. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pd>.
- [14] Quantor Ltd.. *QForm Nejjednodušší simulační systém. Krok za krokem*. [s.l.] : [s.n.], 2004. 81 s. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/QFORM_21_cz.pdf>.

Poděkování

Děkuji prof. ing. Jiřímu Hrubému, CSc. za poskytnuté informace a cenné připomínky k řešení problematice diplomové práce.